

**MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS PARA
MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA RESIDENCIAL RURAL**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis previa a la obtención del título de: Ingeniero Eléctrico

**TEMA:
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS PARA
MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA RESIDENCIAL RURAL**

**AUTOR:
PAÚL ANDRÉS MASACHE ALMEIDA**

**DIRECTOR:
ESTEBAN MAURICIO INGA ORTEGA**

Quito, Marzo de 2015

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Paúl Andrés Masache Almeida autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, 20 de Marzo del 2015

Paúl Andrés Masache Almeida
CC: 1725785552
AUTOR

CERTIFICA

Haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos de la monografía, relacionados a su trabajo de fin de carrera intitulado: ***“Modelamiento y Simulación de Redes Inalámbricas para Medición Inteligente de Energía Eléctrica Residencial Rural”*** realizada por el Sr. Paúl Andrés Masache Almeida, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito, 20 de Marzo del 2015

Mstr. Esteban Inga Ortega
DIRECTOR

DEDICATORIA.

Paúl Andrés Masache Almeida

*Con mucho amor a mí y aprecia a mi familia que con su apoyo y colaboración se
ha podido realizar de la manera más favorable.*

AGRADECIMIENTO.

Paúl Andrés Masache Almeida

Expreso mis más sinceros agradecimientos a mis licenciados e ingenieros por sus enseñanzas, por haberme brindado su conocimiento con la finalidad de mejorar profesional y como persona; también agradezco a mi tutor de tesis el Ingeniero Esteban Inga por haberme dado la confianza para la resolución de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	I
CERTIFICA	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO	IV
INDICE GENERAL.....	V
INDICE DE FIGURAS	VII
INDICE DE TABLAS	VIII
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	IX
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
I. MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA RESIDENCIAL EN ZONAS RURALES	2
1.1 Redes de distribución y medición inteligente de la energía eléctrica residencial	2
a) Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)	6
1.2 Elementos y arquitectura de los sistemas de medición inteligente de energía eléctrica residencial	9
a) Centros de gestión de un AMI.....	10
b) Equipos necesarios para medición inteligente AMI.....	15
c) Redes de medición inteligente AMI.....	17
1.3 Normativa internacional aplicable a medición inteligente de energía eléctrica	19
1.4 Identificación de las zonas rurales con mayor índice de pérdidas no técnicas.	24
CAPÍTULO II	27
II. COMUNICACIONES INALÁMBRICAS EN ZONAS RURALES PARA AMI....	27
2.1 Tecnologías de telecomunicación inalámbrica para zonas rurales	27
a) CDMA, (acceso múltiple por división de código)	29
b) Wimax, (Interoperabilidad mundial de acceso por microondas).....	36
c) LTE, (Tecnología Long Term Evolution)	37
d) White Space, (Tecnología de alta frecuencia VHF, UHF, HF)	39

2.2	Variables que deben ser analizadas en redes inalámbricas para zonas rurales	40
a)	Coberturas	40
b)	Propagación.....	40
c)	Control de potencia	41
d)	Ganancia de los equipos.....	42
e)	Capacidad de la tecnología.....	42
2.3	Modelos para análisis de las redes inalámbricas en zonas rurales.....	44
a)	Modelos empíricos	44
b)	Modelos deterministas	46
c)	Modelos semi-empíricos	48
2.4	Enlace para envío de información desde medidores inteligentes	49
a)	TV White Space	49
CAPÍTULO III		53
III. MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS PARA ZONAS RURALES		53
3.1	Zonificación de áreas AMI según el índice de pérdidas no técnicas	53
3.2	Tráfico, cobertura y calidad de servicio en redes inalámbricas.....	54
a)	Trafico de TV White Space	54
b)	Cobertura para TV White Space	57
c)	Calidad de servicio para TV White Space.....	59
3.3	Modelo de análisis del comportamiento de redes inalámbricas en zonas rurales	60
a)	Modelamiento de la red con los algoritmos de Dijkstra y Kmeans para un ruteo optimo	60
b)	Modelamiento de la red con el algoritmo de Dijkstra y flujo de tráfico con el programa Lp solve	66
c)	Modelamiento de la red con el algoritmo de Greedy para una asignación adecuada de los recursos	69
3.4	Simulación de redes inalámbricas para infraestructura de medición avanzada en zonas rurales	73
a)	Simulación de la red con los algoritmos de Dijkstra y Kmeans para un ruteo optimo	73

b) Simulación de la red con el algoritmo de Dijkstra y flujo de tráfico a partir del programa Lp solve	76
c) Simulación de la red con el algoritmo de Greedy para una asignación adecuada de los recursos	76
CAPÍTULO IV	79
IV. PROGRAMACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA	79
4.1 Análisis de cobertura en zonas rurales	79
a) Análisis de la saturación de los canales de la tecnología TV White Space de acuerdo a la cobertura de la tecnología	80
b) Análisis de la capacidad de los canales de la tecnología TV White Space de acuerdo a la cobertura de la tecnología	83
4.2 Análisis del crecimiento de la infraestructura de comunicaciones celulares con enfoque en operadores móviles virtuales	88
a) Estado actual de la red de fibra óptica	88
b) Análisis de la red de fibra óptica a través de un ruteo óptimo	89
c) Análisis de las redes de comunicaciones a través de una ruta óptima y flujos de carga	95
4.3 Impacto de la infraestructura de medición avanzada en la reducción de pérdidas no técnicas	98
4.4 Plan de negocios e ingeniería de proyectos para medición inteligente..	101
a) Beneficios del proyecto y agentes involucrados	101
b) Medición inteligente, servicio y clientes beneficiados	102
c) Operación y tipos de servicio	103
d) Expansión y gestión	103
CONCLUSIONES	105
RECOMENDACIONES	107
REFERENCIAS.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Medición convencional comparada con medición inteligente	4
Figura 1.2. Arquitectura tradicional de AMI	9
Figura 1.3a. AMI full distribuido.....	14
Figura 1.3b. AMI distribuido	15

Figura 1.4. Elementos de medición inteligente.....	17
--	----

Figura 1.5. Pérdidas totales de Potencia	26
Figura 2.1. Figura a) acceso múltiple por división de frecuencia; Figura b) acceso múltiple por división de tiempo.	31
Figura 2.2. Modelo OSI para CDMA2000	33
Figura 2.3. Modelos de análisis para modelos de propagación	44
Figura 2.4. Ocupación de los canales de TV.....	52
Figura 3.1. Ocupación del espectro UHF en el Ecuador	55
Figura 3.2. Ocupación del espectro VHF en el Ecuador	56
Figura 3.3. Cobertura del espectro tanto en UHF como en VHF.....	59
Figura 4.1. 2000 medidores para 2 canales y 16 sub-canales	80
Figura 4.2. Visualización del contorno de saturación de la figura 4.1.....	81
Figura 4.3. 500 medidores para 2 canales y 16 sub-canales	82
Figura 4.4. Visualización del contorno de saturación de la figura 4.4.....	83
Figura 4.5. Capacidad de los sub-canales, asignación de 2000 usuarios.....	84
Figura 4.6 Visualización del contorno de saturación de la figura 4.5.....	85
Figura 4.7 Capacidad de los sub-canales, asignación de 500 usuarios.....	86
Figura 4.8. Visualización del contorno de saturación de la figura 4.7.....	87
Figura 4.9. Estado actual de la red de fibra óptica	89
Figura 4.10. Ruteo optimo sin la influencia de pesos en la red de fibra óptica	90
Figura 4.11. Ruteo optimo con un peso de la línea de 0.45	91
Figura 4.12. Ruteo optimo con un peso de la línea de 1	92
Figura 4.13. Ruteo optimo sin condiciones ni restricciones de uso de las líneas..	93
Figura 4.14. Ruteo optimo sin condiciones ni restricciones de uso de las líneas..	94
Figura 4.15. Conexión optima por medio de distancias mínimas de enlace	95
Figura 4.17. Curvas de tendencia de datos transmitidos	97
Figura 4.18. Disminución en un 9.66% de las perdidas expuestas por el CONELEC.	100
Figura 4.19. Plan de Negocios para medición inteligente	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Comparación entre red de distribución actual y una red con medición inteligente.....	5
Tabla 1.2 Pérdidas de las empresas eléctricas de distribución	25
Tabla 2.1. Velocidades de transmisión de CDMA2000	33
Tabla 2.2 Comparación de la propagación y cobertura de las frecuencias	35
Tabla 2.3. Sub-bandas de CDMA450	36
Tabla 2.4. Bandas para downlink en LTE con tecnología OFDMA	38

Tabla 3.1. Ocupación del espectro UHF de mayor ocupación del espectro 2013-2014	54
Tabla 3.2 Ocupación del espectro en VHF	56
Tabla 3.3. Estaciones base, y repetidoras por cada rango de frecuencia	58
Tabla 3.4. Datos del modelamiento del algoritmo de Greedy.....	77

GLOSARIO DE TÉRMINOS

AMI	Infraestructura de medición avanzada
AMR	Lectura de medición avanzada
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
BAN	Red de área para edificaciones
CDMA	Acceso múltiple por división de código
CIS	Sistema de información del consumo
CNEL	Corporación Nacional de Electricidad
DMDS	Sistema de gestión de datos medidos
DOWNLINK	Recepción de datos (información)
FDMA	Acceso múltiple por división de frecuencia
GIS	Sistema de información geográfica
GSM	Sistema global para comunicaciones móviles
HAN	Red de área domestica
HF	Alta frecuencia
HSPA	Acceso de paquetes a alta velocidad
IAN	Red de área industrial
IEC	Comisión Electrónica Internacional
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones
LAN	Red de área local
LTE	Long Term Evolution (Evolución a largo plazo)
MAN	Red de área metropolitana

MDS	Sistema de gestión de la demanda distribuido
MVNO	Operador móvil virtual
NAN	Red de área vecindario
OFDMA	Acceso múltiple de división de frecuencia ortogonal
OMS	Sistema de manejo de cortes
TDMA	Acceso múltiple por división del tiempo
TV WHITE SPACE	Espacio no usados (bandas blancas)
UHF	Frecuencias ultra altas
UPLINK	Envío de datos (información)
VHF	Frecuencia muy altas
WAN	Red de área extendida
WIMAX	Interoperabilidad mundial para acceso por microondas
WRAN	Red de área regional inalámbrica

RESUMEN

Paúl Andrés Masache Almeida
pmasache@est.ups.edu.ec
Universidad Politécnica Salesiana

Resumen— La red de distribución requiere de sistemas sofisticados que mejoren la eficiencia y reduzcan el índice de pérdidas no técnicas que existen en el sistema; por medio de un sistema AMI se puede incorporar servicios necesarios para llegar a mejorar las eficiencias que existen en el sistema de distribución, ya que un sistema AMI es capaz medir, controlar, monitorear el sistema de distribución; por lo tanto, por medio de la reutilización de una red inalámbrica nos permite integrar al sistema de distribución características que se requieren para mitigar estas falencias. Para esto es indispensable conocer el comportamiento de comunicaciones inalámbricas que se pueden implementar o que ya se encuentran en pleno funcionamiento en un sector rural y en zonas remotas de difícil acceso, para poder realizar las modelaciones y simulaciones pertinentes para comprobar la factibilidad de incorporar el nuevo servicio de medición inteligente. Con el incremento de la demanda, es indispensable incorporar la medición inteligente de energía eléctrica con la finalidad de no solo reducir pérdidas, sino también de mejorar la eficiencia del sistema de distribución de la energía eléctrica; de esta manera, por medio de los análisis presentados tanto de capacidad y de tráfico se determinan si es factible la reutilización de una tecnología para la implementación de medición inteligente articulado al sistema de distribución eléctrica.

Índice de Términos—Algoritmo dijkstra, algoritmo greedy, infraestructura de medición avanzada, modelamiento, simulación, problema de asignación, pérdidas totales de potencia, red inalámbrica, sistema de distribución, red inteligente, zona rural, medidores inteligentes.

ABSTRACT

Paúl Andrés Masache Almeida
pmasache@est.ups.edu.ec
Universidad Politécnica Salesiana

Abstract — The distribution network requires sophisticated equipment to improve efficiency and reduce the rate of non-technical losses that exist in the system; through an AMI system can enter service needed to reach improving efficiencies that exist in the distribution system, AMI since a system is able to measure, control, and monitor the distribution system; through the reuse of a wireless network allows us to integrate the distribution system characteristics that are required to mitigate these shortcomings. For this it is essential to know the wireless communications that can be implemented or are already in full operation in a rural area, to perform the modeling and relevant simulations to test the feasibility of incorporating the new smart metering service. With increased demand and is essential to incorporate smart metering in order to not only reduce waste, but also to improve the efficiency of the distribution system of electricity; therefore through the analyzes presented both capacity and traffic may determine whether to reuse technology for implementing smart metering in the distribution system is feasible

Index Terms—Algorithm dijkstra, algorithm greedy, advanced metering infrastructure, modeling, simulation, allocation problem, total energy losses, wireless network, distribution system, smart grid, rural area, smart metering.

INTRODUCCIÓN

Con el incremento paulatino de la demanda, las nuevas tecnologías para monitorear y controlar a un sistema eléctrico de potencia, y con el implemento de la generación distribuida, la necesidad de la optimizar el consumo de energía, es de suma importancia el implemento de una red Smart Grid, esta red nos brinda la facilidad de incorporar nuevas funciones y servicios al sistema; esta red brinda la factibilidad de incorporar un sistema más dinámico; para hablar de un Smart grid, es necesario poseer un infraestructura de medición avanzada, que nos permite controlar y monitorear el sistema en tiempo real, o en intervalos de tiempo; esta infraestructura debe de constar de 5 básicos para la medición como es el DMDS, DMS, CIS, OMS, GIS. Para que esta infraestructura sea fiable, confiable y estable, se necesita de un medio óptimo de comunicación, este medio puede ser alámbrico o inalámbrico, todo depende de la cobertura, el tráfico y la propagación de la tecnología, las comunicaciones que poseen estas características en zonas rurales son CDMA, TV White Space, LTE, por su buena propagación y cobertura, una de las ventajas de optar por una red de las mencionadas, es la posibilidad de utilizar su espectro para brindar los servicios pertinentes de medición inteligente, sin la necesidad de afectar los servicios que se encuentren prestando en ese instante de reutilización. Para conocer la factibilidad de la reutilización de una de las tecnologías mencionadas es necesario comprobar las capacidades de la tecnología, para ello existen algoritmos matemáticos que benefician al estudio, por medio de variables que son ingresadas dependiendo de la tecnología de comunicación utilizada, nos brindar resultados por medio de simulaciones; estas simulaciones son interpretadas y analizadas para una mejor comprensión del comportamiento de la tecnología en diferentes casos de estudio; el modelamiento y la simulación nos ayudaran a la comprensión de la factibilidad de la incorporación de un medición inteligente para las redes de distribución; principalmente para controlar, monitorear y brindarle confiabilidad al sistema eléctrico de potencia.

CAPÍTULO I

I. MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA RESIDENCIAL EN ZONAS RURALES

La medición inteligente se ha venido proponiendo e investigando por varios años; con la finalidad de mejorar los servicios de la energía eléctrica. Esta medición es necesaria para tener una mejor estabilidad en el sistema y poder controlarlo de forma eficiente y eficaz; por tal razón la medición inteligente aplicado a las redes de energía eléctrica es fundamental para incorporar las mejoras en la producción de la energía renovable, como por ejemplo la generación distribuida. En este capítulo se centra en los conceptos fundamentales para tener un mejor conocimiento de la medición inteligente, la arquitectura y los elementos que le conforman, la normativa necesaria para su implementación y las zonificación rural en Ecuador de acuerdo a las pérdidas en el sistema eléctrico.

1.1 Redes de distribución y medición inteligente de la energía eléctrica residencial.

Las redes de distribución han ido cambiando y mejorando paulatinamente, con el ingreso de mayores consumidores finales a la red, con la finalidad de mantener la eficiencia del sistema; pero con la demanda que se ha incrementado, la red de distribución se ha vuelto difícil de mantener su estabilidad y su calidad de servicio; se ha vuelto una red muy parcializada y muy complicada de controlar, más aun con la futura implementación de las cocinas de inducción y de la llegada de los vehículos eléctricos existe la necesidad de tener un control mayor de la red, conocer en su totalidad, la variación de carga que se puede producir cuando existe carga que se puede movilizar de un sitio a otro, como son los vehículos eléctricos [1]. Por lo tanto se necesita incorporar equipos que mejoren la eficiencia y eficacia del sistema, principalmente las redes de distribución en donde se encuentra la demanda de los consumidores finales y donde no existe control alguno de la energía que se encuentra ofertando de forma diaria, existe la necesidad de forma urgente de implementar un sistema que sea capaz de mejorar las falencias que existen en las redes de distribución y que el consumidor pueda tener un mejor

control del consumo de su energía eléctrica. Para ello existen varios puntos fundamentales que se deben de tomar en cuenta para tener un sistema más eficiente [2].

- Control y monitoreo de la demanda
- Eficiencia de la red de distribución

Estos parámetros son necesarios para mantener un buen sistema, para ello hay la necesidad de implementar un sistema inteligente sobre la red de distribución; la red inteligente o también llamada Smart Grid, es una red capaz de proporcionar eficacia, eficiencia, mantener o mejorar la calidad de servicio. Pero para poder hablar de una red inteligente se debe de tener una medición inteligente, la medición inteligente es una parte fundamental de un sistema o red inteligente ya que proporciona todos los recursos para saber el estado de la red [3], una de las ventajas de incorporar una medición inteligente es: La detección e aislar las fallas y restaurar el servicio del sistema. Para esto se debe de tener un control sobre los alimentadores, y poseer una medición remota de los terminales de la red, con esto se pretende reducir el tiempo de operación y de despeje de fallas. También es fundamental la distribución del flujo de energía. Ya que con ello podemos tener un intercambio de flujo tanto desde los centros de generación como también desde las cargas por medio de la generación distribuida o micro redes, en la actualidad el flujo de la energía es unidireccional [4][5], es decir que va desde las centrales de generación hasta los consumidores finales, pero es indispensable ya que a un futuro se tiene que controlar el flujo direccional por la incorporación de generación distribuida de la generación renovable [6][7].

En consecuencia con lo antes expuesto, la medición inteligente a través de un sistema adecuado de comunicaciones nos proporciona las siguientes ventajas; Poder comunicar los datos en dos vías, es decir enviar datos (uplink) y recibir datos (downlink); recopilación de datos necesarios que se requieren las empresas distribuidoras para que realicen cada una de las operaciones para mantener monitorizado el sistema; registro de datos y el almacenamiento de datos, esta operación se la realiza en las empresas de distribución ya que ellos tienen los servidores para salvaguardar la información que requieran, los equipos de

medición de los consumidores solo se encargan de medir y enviar la información no se encargan de almacenar datos de las mediciones; debe de tener la capacidad de controlar del consumo, los consumidores tienen la ventaja de ver el consumo diario y respecto a ello pueden controlar su consumo; seguridad de los datos recolectados, es indispensable que los datos solo sean verificados por las empresas de distribución y no alterados por terceros, ya que esto puede causar la obtención de medidas erróneas que afecten al sistema eléctrico; visualización y facturación del consumo, con respecto al consumo individual de cada usuario, esto junto al control del consumo benefician al usuario final ya que se le da la facilidad de poder controlar su consumo energético [8][6]; la demanda automática responsable tiene mucho que ver con poder distribuir de mejor manera el consumo energético, con la final de reducir los picos de consumo, esto conlleva a una disminución de la demanda que se debe de satisfacer, y un mejoramiento en la eficiencia del sistema eléctrico. Cada uno de estos factores ayuda a que la medición inteligente se la realice de la mejor manera posible, implementando nuevos servicios al sistema, controlando y monitorizando de forma centralizada al sistema eléctrico [8][9].

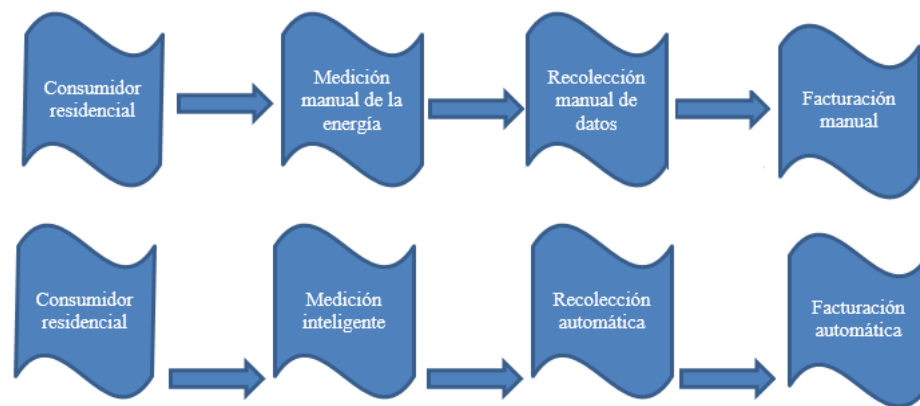


Figura 1.1. Medición convencional comparada con medición inteligente
Fuente: [10] J. Zheng, D. W. Gao, and L. Lin, "Smart Meters in Smart Grid: An Overview,"

Con la implementación de una medición inteligente se efectuarán varios cambios al sistema de distribución actual, para el mejoramiento del sistema y poder brindar un servicio confiable y eficiente, como por ejemplo la incorporación de equipos de censado para monitorear y brindar datos verídicos de cada una de las partes de la

red de distribución, en la siguiente tabla se realiza una comparación más detallada de las características que posee una red actual con una red que se encuentra incorporada medición inteligente [10].

	Red actual	Red con medición inteligente
Información del flujo	Unidireccional	Bidireccional
Generación eléctrica	Generación centralizada	Generación distribuida
Topología	Radial	Red
Sensores	Pocos sensores	Muchos sensores
Monitoreo	Sin monitoreo	Auto monitoreo
Recuperación del sistema	Restablecimiento manual	Reconfiguración automática
Testing	Chequeo manual	Chequeo remoto
Control	Control limitado	Control omnipresente
Eficiencia	Baja eficiencia	Alta eficiencia
Contaminación ambiental	Alta contaminación	Baja contaminación

Tabla 1.1 Comparación entre red de distribución actual y una red con medición inteligente
Fuente: [11] R. Ma, H. Chen, Y. Huang, W. Meng, and S. Member, "Smart Grid Communication : Its Challenges and Opportunities,"

Estos cambios que se producen con la implementación de la medición inteligente nos ayudan a brindar mayor información del consumo de la energía eléctrica tanto a los operadores como a los consumidores, las ventajas que se obtiene de la medición inteligente es poder tener una facturación en tiempo real, esta facturación, en esta facturación estará incluido todo lo que ha generado al sistema y lo que ha consumido, en el caso de que exista generación distribuida, ya que los equipos encargados para la medición inteligente tienen la capacidad de realizar esta operación, además tiene la ventaja de poder realizar cortes y reconexiones de forma automática, puede obtener datos de los equipos que se encuentran adyacentes al medidor, tanto de la red de distribución como de los dispositivos del hogar.

Con todos estos servicios podemos citar varios beneficios tras la implementación de una infraestructura de medición inteligente, estos beneficios pueden beneficiar tanto a los consumidores como a los centros de distribución de energía eléctrica; con un sistema de medición inteligente se tendrá un ahorro monetario y de tiempo en la lectura y la facturación de los equipos de medición, se tendría una mejor gestión de la energía en las horas pico de la demanda, se reutilizaría al personal encargado de conexión y reconexión para el mejoramiento de las redes de distribución, se ofrecería un nuevo modelo tarifario para el sistema eléctrico, se tendría un mejor dimensionamiento de los equipos de distribución. Otros aspectos que beneficia la medición inteligente es la capacidad de proporcionar al usuario su consumo eléctrico, esto le ayuda a planificar, ya sea reduciendo o incrementando su consumo eléctrico, también ayuda a la solventar la demanda diaria, de acuerdo a valores reales de consumo, uno de los puntos fuertes de la medición inteligente es que con los datos obtenidos tras la medición se puede mejorar la estabilidad, la eficiencia, la fiabilidad, el manejo de los recursos para la obtención de la energía, la calidad del sistema eléctrico[12].

a) Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)

Cuando mencionamos medición inteligente se debe de aclarar que existen dos tipos de mediciones, AMR y AMI. Cuando hablamos de AMR se está refiriendo a la lectura automática de los medidores [13], es un tipo de medición inteligente en la cual solo se realiza una comunicación tipo uplink y no downlink, este tipo de servicio solo requiere una comunicación unidireccional ya que solo nos interesa recibir los datos de los equipos de medición, y no nos interesa enviar información al medidor, una de las desventajas de usar este sistema es que no existe la posibilidad de realizar cortes y conexiones de los medidores, aquí no se puede brindar muchos de los servicios citados anteriormente, AMR fue uno de los primeros pasos que se dieron para la implementación de lo que se refiere por medición inteligente, pero por el motivo que no existía un control de las redes y de los recursos se optó por modificar y mejorar e integrar lo que es el control de la red. El AMR solo tenía la opción de recolectar los datos y no visualizarlos [14][15].

En cambio AMI se refiere a una infraestructura de medición avanzada, en donde

es un avance de AMR, AMI integra todas las funciones de monitoreo, control, automatización del sistema eléctrico, poder establecer una comunicación optima entre las empresas de distribución con los consumidores finales, AMI posee grandes mejoras y a gran funcionalidad que se mencionó anteriormente en la medición inteligente, una de las grandes diferencias de AMR y AMI es el flujo de la comunicación, AMI es bidireccional puede realizar todas las funciones de comunicación tanto en uplink como en downlink, puede realizar cortes y conexiones de los equipos de medición, AMI es el principio básico y fundamental de lo que se refiere a medición inteligente [14][16].

AMI provee al usuario el conocimiento de su consumo en tiempo real y así el usuario opta por mantener el consumo y pagar su facturación de acuerdo a lo que está consumiendo, u optimizar su consumo, es decir, solo consumir lo necesario y así mejorar la facturación y eficiencia del sistema, AMI no solo ayuda al usuario, también a las empresas de suministran la energía, conociendo las pérdidas que se pueden producir en la red eléctrica, por medio del monitoreo de la demanda y controlando las fallas de forma más eficiente, en síntesis, la AMI hace que el sistema sea más eficaz en tiempo real. Con todo esto nos conlleva a determinar que para tener un control y monitoreo de la red eléctrica es necesario la implementación de un sistema AMI [17][18], pero para aplicar un sistema AMI se necesita 3 aspectos importantes, tener monitoreado el sistema para conocer el estado y la operación a cada momento, tener un control total de cada uno de los equipos de medición, principalmente en el envío de los datos desde usuarios residenciales hasta las empresas de distribución de la energía eléctrica, para tener un monitoreo y control optimo se necesita tener una infraestructura que enlace a los centros de control de la energía con los dispositivos de medición de los consumidores, y una arquitectura que incorpore todas las funciones de operación de una sistema AMI [19][20], y esta arquitectura posee dos roles fundamentales de operación, el primer rol es un acceso a la información de forma detallada, este acceso de los datos van a depender de las empresas de distribución, es decir, que su acceso puede ser mensualmente, cada 15 días hasta 15 minutos, el segundo rol que debe de ser tomado encuentra en un sistema AMI, es la

comunicación bidireccional ya que mientras se adquiere los datos de los medidores, se puede dar comandos de instrucción o envío de mensajes a los medidores eléctricos; pero para poder tener una interacción entre los medidores inteligentes y las empresas de distribución, también se requiere que las empresas obtengan varios cambios como por ejemplo; se requiere implementar un manejo en la comunicación y que esta comunicación sea lo suficientemente flexible para soportar los datos que se enviarán desde los medidores y al mismo tiempo las instrucciones desde las empresas de distribución, por eso a la arquitectura de la medición inteligente debe poseer las siguientes funciones básicas como son las que se puede mencionar a continuación [6][21]:

- Detección y medida del sistema
- Digitalización de datos y almacenamiento
- Procesamiento y análisis de datos
- Comunicación local y remota y visualización de datos
- Estándar abierto para una fácil interoperabilidad de los equipos del sistema y una flexibilidad en la comunicación
- Comunicación bidireccional para tener un óptimo control avanzado y configuración de los dispositivos remotos.
- Redes inalámbricas domésticas para el mejoramiento de la demanda y de dispositivos de control de las cargas
- Interruptores de conexión y de desconexión avanzada
- Notificación de cortes del servicio y la capacidad de restaurar el sistema ante estos cortes.

La medición inteligente es un ámbito muy amplio ya que se requiere de aplicaciones tanto para enviar como para recibir la información, una medición inteligente necesita de una arquitectura y elementos destinados para control y monitorear la red eléctrica, tecnologías destinadas tanto para software como para hardware. En síntesis una medición inteligente hace referencias a todo el proceso encargado de medir el consumo y la entrega de energía eléctrica al sistema, por medio de equipos o dispositivos especializados para realizar estas tareas, y estos equipos deben de tener la factibilidad de poder realizar desconexiones y

conexiones del sistema o de cargas parcializadas, es decir, que en las redes de transmisión existan equipos automáticos que puedan conectar o desconectarse cuando el sistema lo requiera, y lo más importante que en los consumidores finales existan equipos que tengan la capacidad de realizar conexión o desconexión [22][23].

1.2 Elementos y arquitectura de los sistemas de medición inteligente de energía eléctrica residencial

Para que exista un funcionamiento óptimo de un sistema que brinde medición inteligente se debe de constar de varios elementos básicos de operación, cada uno de estos elementos deben de tener un rol destinado y una función de operación, con la finalidad de proporcionar la información que es indispensable para la operación.

Con la implementación de AMI, ayuda a mejorar el sistema eléctrico, más que nada la información que es suministrada por los consumidores hacia las empresas de distribución, el monitoreo y el control de los diferentes procesos del sistema de distribución; pero para ello se requiere de implementar una infraestructura, que pueda censar el consumo del usuario por medio de equipos de medición, esta infraestructura nos sirve para la comunicación entre los dispositivos de medida y los servidores que van a almacenar los datos, también para las empresas que se encargan de controlar al sistema y la información suministrada por los equipos [19].

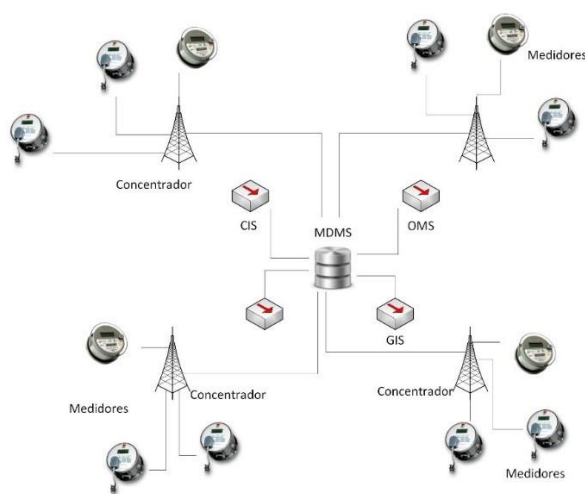


Figura 1.2. Arquitectura tradicional de AMI

Fuente: [24] J. Zhou, R. Q. Hu, and S. Member, "Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid,"

a) *Centros de gestión de un AMI*

Una de las ventajas del uso de AMI, es la gran capacidad de conectividad que poseen los equipos de medición, esta red tiene la capacidad de usar un sin número de comunicaciones, ya sean alámbricas como inalámbricas, por tal motivo para poder incorporar estas funciones se debe de establecer niveles de operación [6], en cada nivel existe el empleo de las funciones expuestas anteriormente, y la aplicación de las funciones que tiene un AMI.

Nivel 1. Nivel de localización, aquí se incluye todos los elementos como los sensores, funciones de análisis locales, estos análisis son integrados y por medio del monitoreo y el análisis se puede enviar los datos procesados por medio de comunicaciones remotas, y estos datos que son enviados desde los dispositivos de medición son almacenados y visualizados en los centros o empresas de distribución [6].

En el nivel 2, se especifica tanto el monitoreo y el diagnostico por parte de las empresas de distribución, la información enviada de los dispositivos de medida es fundamental importancia para el sistema de distribución, ya que sin ellos no existiría un control adecuado de las operaciones y del manejo del sistema. Para ello debe de existir una topología flexible en donde se puedan acoplar los diferentes dispositivos que se encargaran de obtener los datos [6].

En el último nivel, en el nivel 3 se hace referencias a todo lo que tiene que ver con los centros de control, en un sistema es necesario implementar un cuarto o centro en donde se permita almacenar todos los datos que son enviados desde los consumidores, y también poder visualizar el estado del sistema, mantener un control óptimo de este servicio eléctrico, un control y monitoreo en tiempo real. Para las empresas de distribución es de suma importancia tener el control total del sistema, poder adquirir los datos necesarios, reportes actualizados del sistema en tiempo real, y contar con una base de datos que nos permita tomar decisiones de planeación del sistema eléctrico [6].

Estos niveles nos ayudan a tener una mejor visión de cómo está conformado un sistema de medición avanzado, como opera y que recursos son necesarios para

que pueda brindar los servicios pertinentes para mantener el servicio eléctrico en buen estado, a pesar de ellos también se necesita de sistemas para el manejo de la información, a continuación se detalla dichos sistemas.

DMDS, Sistema de gestión de datos medidos.- es una base de datos que nos permite almacenar toda la información que envían los equipos de medición, los diferentes eventos que son suscitados en el medidor, como por ejemplo interrupción del servicio fallos, esta información es indispensable para las empresas de distribución ya que con esta información se puede realizar operación y gestión del recurso eléctrico, claro que para tener una buena gestión es indispensable incorporar los diferentes sistemas que posee la medición inteligente como es OMS, GIS, CIS, DMS [6] [25][26].

(DMS), Sistema de gestión de la demanda distribuido, son todas las aplicaciones que se necesitan para poder monitorear y manejar las fluctuación de la demanda y de mantener la estabilidad del sistema, por medio de la integración computacional a la red de distribución y una interface de monitoreo que es capaz de supervisar la operación y el consumo del recurso eléctrico. El DMS tiene una gran ventaja que es la obtención de datos del sistema y poder albergarlos en bases de datos, esta base de datos debe de resguardar la información que el sistema, la información obtenida es de gran utilidad para crear estrategias de operación o de restauración del sistema en caso de que se produzca una falla en alguna línea de distribución. Este sistema es indispensable para que los operadores puedan comprender el estado del sistema y que las empresas de distribución puedan actuar de forma más eficiente frente a desconexiones de carga o frente a pérdidas de energía eléctrica. La finalidad de implementar un sistema que sea capaz de controlar la red de distribución es de obtener la información necesaria para poder controlar de forma más efectiva cuando se produce una falla en las líneas o poder controlar las pérdidas que se pueden generar en las redes de distribución [6][27][15].

En síntesis un DMS es la ampliación del sistema SCADA a la parte de las redes de distribución, ya que tiene las mismas funciones que un sistema SCADA, un DMS posee grandes funciones y aplicaciones en las redes de distribución, Análisis de contingencia. Es una ventaja ya que con el DMS y su obtención de datos se

puede realizar planes de contingencias que no afecten ni al sistema de distribución, ni a los consumidores finales, con la finalidad mejorar el servicio eléctrico [25].

El DMS nos facilita la integración de la generación renovable, ya que se puede crear micro redes, es decir vamos a poder incorporar sistemas de generación distribuida, técnicas de almacenamiento de energía, gestión, control y monitoreo del flujo direccional de potencia ya que la generación distribuida se va a encontrar en la carga.

Al DMS se lo puede dividir en 3 partes importantes con la finalidad de comprender mejor el funcionamiento; DMS hardware, DMS software y el DMS base de datos. Cuando se menciona el DMS hardware hace referencia a todos los equipos encargados de almacenar los datos, a los dispositivos de interface de usuario que se encuentran localizados en los centros de monitoreo y control de las empresas de distribución, imágenes electrónicas que detallen el funcionamiento del sistema de distribución, dispositivos encargados de monitorear las terminales y equipos conectados a ellos. En cambio el DMS software hace referencia a los programas necesarios para el funcionamiento óptimo como son los sistemas operativos, estos pueden ser sistemas libres o pagados, las aplicaciones del software en donde se puede tener una interacción en tiempo real del sistema, software encargado de la incorporación de los redes de comunicación, centros de manejo de operaciones, consolas y equipos de mando y control. Y el DMS base de datos es la área en donde se almacena, se archiva toda la información requerida por las empresas de distribución, en esta aplicación debe existir equipos encargados de clasificar la información necesaria o básica del sistema con la información que no tiene relevancia para el sistema [28].

El DMS es fundamental en una red inteligente para su control, monitoreo, y eficiencia del sistema pero para que exista esta adquisición de datos, es necesario implementar una infraestructura de medición como lo es AMI, cuando mencionamos AMI nos referimos a todos los equipos necesarios para implementar una medición inteligente.

OMS, o también conocido como sistema de manejo de cortes, cuando se

implementa en el sistema un OMS, se puede apreciar como las empresas de distribución empiezan a recibir datos de fallos que se produjeron en las redes de distribución, estos datos de fallas son producidos principalmente por interrupciones en el servicio, por restauraciones automáticas del sistema, fallas en los equipos que se encuentran enlazados al sistema, por roturas en las líneas de distribución, por perturbaciones del sistema, por eso es indispensable que el OMS se encargue de clasificar e identificar fallas en los equipos y cables y aquellas fallas que son de gran magnitud, aquellas que no son despejadas de forma automática, que requieren de alguna intervención del personal [14]. Una ventaja del uso de un OMS es la flexibilidad del control de fallos, la capacidad de almacenamiento tanto de la causa del fallo como la acción que se efectúa para el despeje de la falla o el control inmediato [29].

GIS, sistema de información geográfica, son todas las herramientas que se encargan de almacenar, de la interacción con el usuario, manejo de información de cada uno de los equipos que se encuentren enlazados a la red de distribución, con el GIS podemos conocer las funciones, operaciones, análisis, poder comparar, modelar y simular con los datos obtenidos del sistema de distribución; también vamos a poder tener una base de datos en tiempo real de las redes de distribución. El GIS ayuda de forma indirecta a la medición inteligente ya que es un software automático que brinda estos beneficios al sistema [29].

CIS, sistema de información del consumo, este sistema es para el beneficio del usuario ya que por medio del CIS, puede determinar los valores que se le va a facturar, de forma detallada de acuerdo a su consumo de energía eléctrica, el CIS posee una software que se encarga de administrar, almacenar, distribuir y visualizar la información detallada del consumo de la energía de los usuarios residenciales. Estas aplicaciones ayudan a que el usuario tenga la facultad de gestionar mejor su consumo eléctrico [29].

Estos parámetros son necesarios en una red de distribución en donde se implemente una medición avanzada, y con la implementación de un AMI, se facilita brindar a los consumidores todos los beneficios citados anteriormente. Pero también una red con una mejor distribución y procesamiento de datos, va a tener

una mayor confiabilidad y mejor fluidez; es decir una mayor velocidad de transmisión de la información; una infraestructura distribuida y full distribuida es la solución para el análisis y procesamiento de la información, a continuación se explica de mejor manera en las siguientes ilustraciones.

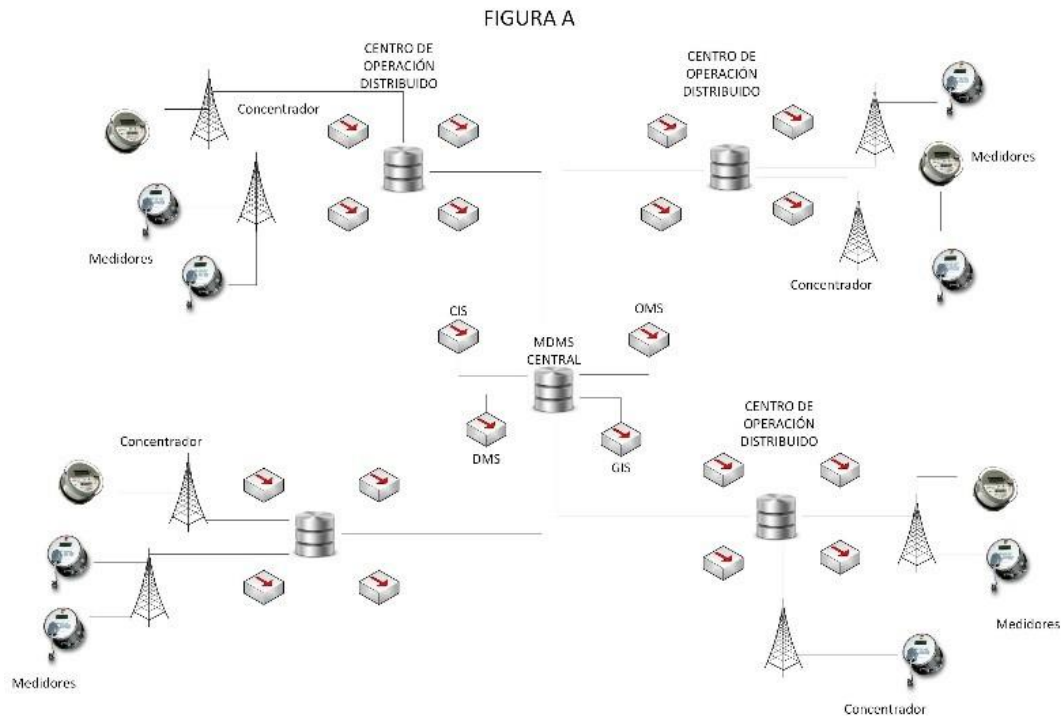


Figura 1.3a. AMI full distribuido.

Fuente: [24] J. Zhou, R. Q. Hu, and S. Member, "Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid,"

Existen varias ventajas de usar un AMI full distribuido, no existe una aglomeración de información en los centros de operación, también otra ventaja es que la información recibida de los medidores es procesada, analizada por los centros distribuidos y estos centros solo envían la información necesaria al centro de operaciones, esto hace que el centro obtenga información precisa para el control, monitoreo de las redes de distribución, facturación, cortes y reconexiones de los equipos de medición. Pero al poseer un AMI full distribuido los costos de inversión son más alto pero la confiabilidad del sistema se incrementa.

Un AMI distribuido en cambio posee las características básicas en las cuales opera AMI, posee un Sistema de gestión MDMS, DMS, OMS, CIS y GIS, para toda la infraestructura, la desventaja es la conglomeración de la información, se

requiere equipos de procesamiento de datos mayor pero en cuestión de inversión es menor que la full distribuida.

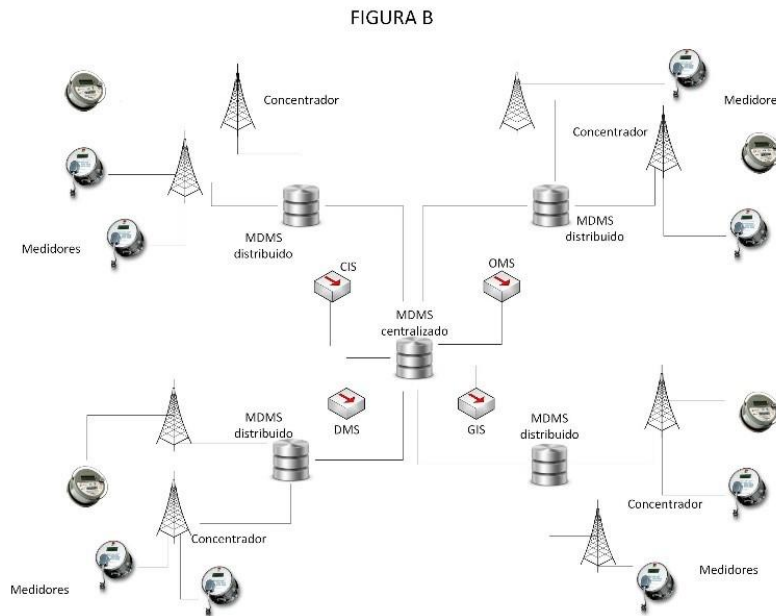


Figura 1.4b. AMI distribuido

Fuente: [24] J. Zhou, R. Q. Hu, and S. Member, "Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid,"

b) Equipos necesarios para medición inteligente AMI

Como ya se ha mencionado AMI es un sistema muy amplio por eso también requiere de equipos necesarios para medición, procesamiento de datos, y bases de datos. Cada equipo consta con una función específica que hace que el sistema AMI, sea más flexible y robusto al mismo tiempo, por eso se mencionan los equipos necesarios para que se pueda establecer un sistema AMI.

Estación Master AMI.- en esta estación contamos con todas las funciones de control remoto, monitoreo de la red de distribución, el personal de la estación tendrá la facultad de conectar, desconectar, gestionar y controlar las cargas asociadas a la estación, una de las ventajas de poseer una estación Maestra es poder determinar fallas, perdidas en el sistema, actualización del firmware y software de los equipos, facturación del consumo de la energía, ya que la estación tendrá acceso a la base de datos y a la información en tiempo real que envía los medidores.

Medidores AMI.- el medidor es encargado de adquirir el consumo energético de

los usuarios residenciales finales, el medidor se encuentra conectado a la estación maestra ya sea por un concentrador o de forma directa; el medidor tiene la facultad de albergar datos fundamentales para los usuarios, como es la información de la facturación, puede registrar las interrupciones, fallos en el suministro de energía, condiciones de sobre voltaje, todos estos eventos envía a la estación maestra para que desde la estación se realice el control de las diferentes fallas.

Unidad de interface para el cliente AMI.- esta unidad permite al usuario poder ver el consumo de energía eléctrica y la información de la facturación, también tiene la capacidad de almacenar datos históricos.

Equipos de control.- son todos los equipos que podemos realizar un control automático, estos equipos son de uso cotidiano del usuario, el control lo realiza el usuario, con la finalidad de mejorar el consumo eléctrico del consumidor.

Comunicación de red.- es fundamental poseer una buena red de comunicación ya que es la conexión entre los usuarios y las empresas de distribución, es el enlace que posee AMI; por tal razón a la arquitectura se le ha dividido en cuatro áreas de comunicación, LAN (local area network), WAN (wide area network), MAN (metropolitan area network) Y HAN (home área network).

Concentrador.- la principal función del concentrador es de brindar una conexión entre los dispositivos de medición con la red de comunicación; los concentradores son equipos que no necesariamente deben de estar implementados, ya que los medidores pueden tener una conexión, comunicación directa con la red de comunicación.

Resumen de operación de funciones.- AMI debe de proporcionar una comunicación estable, bidireccional y la capacidad de auto recuperarse, por eso el medidor es el encargado de saber de las fallas, cortes, con la finalidad de enviar la información a las empresas de distribución para que ellas se encarguen de solucionar si el problema es de gravedad; las empresas de distribución con los datos enviados deben de actuar en caso de fallas y realizar operaciones de carga, como es conectar y desconectar carga en caso de ser necesario, todas estas operaciones de maniobra deben de ser almacenadas en bases de datos y poder

visualizadas en cualquier instante que la empresa lo requiera.

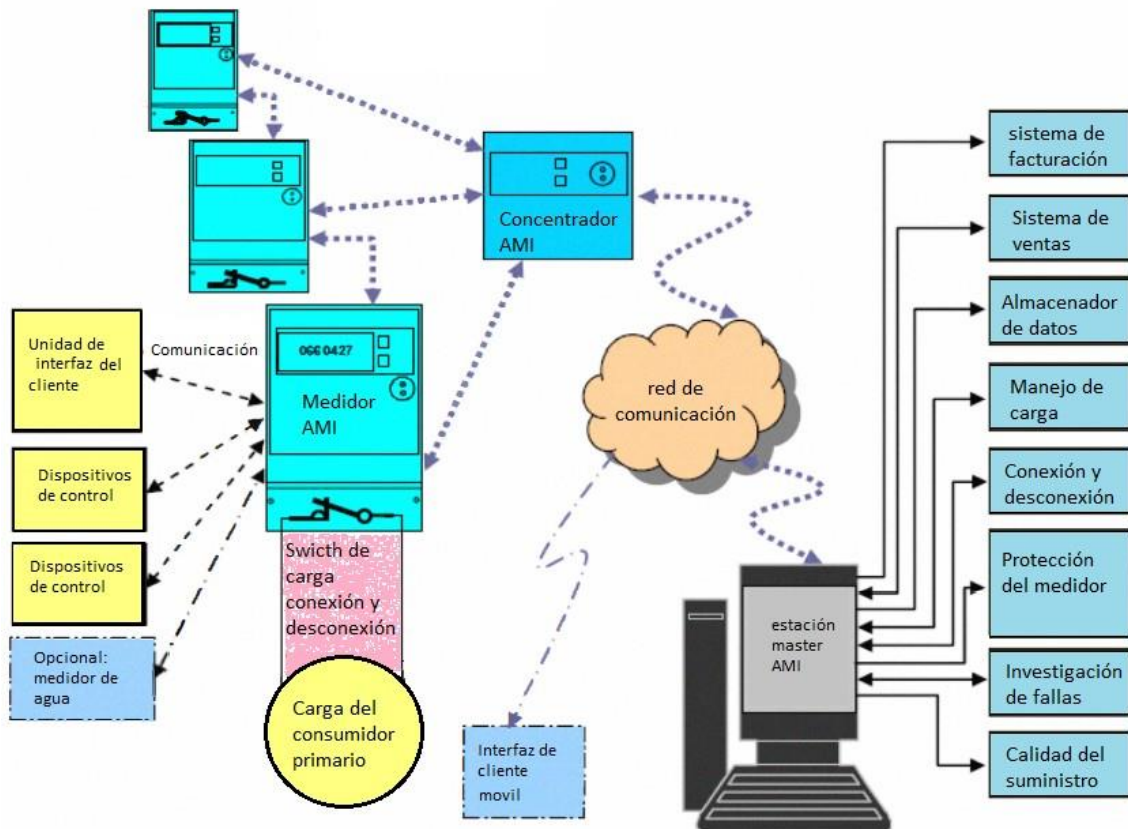


Figura 1.5. Elementos de medición inteligente

Fuente: [30] M. Nthontho, S. Winberg, and S. Chowdhury, "Smart communication networks standards for smart energy management,"

c) Redes de medición inteligente AMI

En un sistema como es AMI a la arquitectura se lo puede dividir en cuatro secciones fundamentales, cada una de las redes que se mencionan a continuación se las dividió basándose en las zonas comprendidas por AMI cubiertas por una red de comunicación; estas redes se fundamentan en las redes IP, por su seguridad y por la interoperabilidad que posee las redes IP.

- LAN (local area network).
- WAN (wide area network).
- MAN (metropolitan area network).
- HAN (home area network).
- BAN (building area network).

- IAN (industrial area network).
- NAN (neighborhood area network).

LAN (local area network), la red LAN de AMI, incluye todas las estaciones en donde se podrá realizar el control, monitoreo, y visualización del sistema en tiempo real, aquí constan todos los equipos y personal necesario para el monitoreo y para el mantenimiento. La red LAN puede ser estructurada de dos formas fundamentales, la una es una red propia, independiente, es decir la implementación de una infraestructura nueva, pero su inversión es demasiado costosa para llevarle a la práctica, la segunda solución es de incorporar la red LAN de AMI es una estructura que brinda ya un servicio, como por ejemplo en una red de internet una TCP/IP, la gran desventaja es la seguridad que brinda, por el simple hecho de estar compartiendo la infraestructura de comunicación; esta opción es más económica [30].

WAN (wide area network), es un medio de comunicación para enlazar a los dispositivos de medición, con las estaciones bases, estas estaciones bases sirven como punto de enlace de todos los medidores, reciben la información y esta información es enviada al centro de control o también llamada como estación base de control. Para enlazar estos dispositivos se lo puede hacer por red alámbrica esto puede ser fibra óptica o comunicación PLC, o inalámbrica como los servicios brindados por las redes celulares como GPRS, CDMA, WIMAX, LTE, RFID, WHF una gran ventaja de usar redes celulares para la comunicación es poder tener una interoperabilidad entre los diferentes dispositivos, medidores inteligentes, concentradores y bases de datos [30][31].

MAN (metropolitan area network), es un medio de comunicación inalámbrico, es muy usado para enlazar los contadores inteligentes de las casas a los medidores; el estándar más usado para esta comunicación es a IEEE 802.11, una red WIFI para su conexión [30].

HAN (home área network). Es una comunicación de los contadores inteligentes, y los aparatos de consumo de energía eléctrica de los hogares de los consumidores finales; para la comunicación se puede usar redes de RFID, WIFI, la comunicación que más se ha investigado y más se emplea en áreas HAN es el

estándar de comunicación ZigBee, por su diseño flexible y la versatilidad de red que posee [32].

BAN (building area network). El BAN tiene mucha similitud a una red LAN, pero el alcance de la BAN es diferente, la conglomeración de LAN, forman una BAN. Pero en cambio el BAN en medición inteligente es utilizado para el monitoreo, el control de la energía sé que va a suministrar; los medios más usados en esta red es Wi-Fi o ZigBee, estas dos tecnologías son las más usadas para tener un buen rango de cobertura y brindar los servicios que presta [33].

IAN (industrial area network). Posee mucha similitud con una der del tipo LAN, la forma de aplicación es la misma, lo que varía es en donde se aplica este tipo de red, es decir, que las IAN se suelen implementar en fábricas, industrias, en donde se quiera controlar y monitorear maquinaria de producción por medio de procesos computacionales, a una red del tipo IAN por el concepto se familiariza con una red ILAN los dos tipos de redes son industriales y se las utiliza con el mismo fin [34].

NAN (neighborhood area network). Una red NAN es muy utilizada para la interconexión de los HAN, en un rango de cobertura muy limitado, En una red inteligente el NAN es muy utilizado para recolectar los datos múltiples que envían los HAN y por medio de un concentrador de datos NAN enviarlos a las empresas de distribución, es decir, que el NAN es el enlace entre el HAN y la empresa [35].

Con el mejoramiento del estándar IEEE 802.11, en lo que es seguridad, protocolos, en lo que se refiere a envió de datos y recepción, y la gran facilidad de poder incorporar datos geo-referenciados, sin la necesidad de incorporar GPS para en los equipos, por eso se piensa usar este estándar en algunas áreas de la arquitectura, como lo es WAN, ya en MAN ya se usa conexión Wi-Fi [6][30].

1.3 Normativa internacional aplicable a medición inteligente de energía eléctrica

En un sistema de medición inteligente es importante la información que se está transmitiendo, por tal motivo debe de existir normas que determinen el buen funcionamiento de los diferentes parámetros que se requieren para brindar los diferentes servicios y tener una buena operación de cada uno de los equipos necesarios para aplicar una medición inteligente. Con una buena normativa no

solo garantizamos un buen servicio, sino que también estamos promoviendo a tener mejor seguridad en los datos, en los equipo, un mejor manejo de la información por parte de los centros de control; también garantizamos que exista una interoperabilidad entre los equipos, y una mejor respuesta por medio del monitoreo y del control de datos [6][36].

Existen normativas, estándares y protocolos responsables de las diferentes operaciones en un Smart Grid, pero se le ha dividido en dos grupos primordiales; sistemas de comunicaciones específicas y sistema de comunicaciones auxiliares. En las comunicaciones específicas podemos encontrar la IEEE C37.118 esta norma específica la sincronización fasorial en el sistema de potencia, ANSI C12.19, C12.21, C12.22, C12.18 son normas que especifican el intercambio de datos entre el consumidor de energía y las bases de datos, entre otras más; en cambio las auxiliares tenemos IEC 62439 o también conocido como protocolo de redundancia paralela, es una norma que permite superar cualquier fallo en el sistema sin que afecte la transmisión de datos, IEEE 1588 es una norma que permite la sincronización y una precisión adecuada para el sistema de medición y control. Existen también normas encargadas de estandarizar tanto la comunicación como las redes de transmisión, es el caso de la norma IEC 62056, esta norma se refiere a tres puntos importantes; medición inteligente, intercambio de datos medidos, tarifas y el control de cargas; en cambio la IEC 61334, se refiere a la automatización de los equipos por las líneas de la red de distribución, en cambio la IEEE 2030P es una norma que trata de establecer la interoperabilidad entre los diferentes equipos de una red inteligente, incluyendo los niveles de alimentación y el funcionamiento de los equipos, principalmente de los medidores inteligentes; a continuación se detallara de mejor manera cada una de estas normativas, estándares y protocolos [6][37].

Normativas internacionales	Campo de Aplicación
<u>ANSI C12.19</u>	Intercambio de datos obtenidos de los medidores inteligentes para las empresas de distribución
<u>ANSI C12.18</u>	Establece la comunicación entre los medidores y las empresas de

	distribución.
<u>ANSI C12.21</u>	Equipos necesarios para la comunicación y la forma de envío de los datos
<u>ANSI C12.22</u>	Transporte de datos, y los mecanismos básicos para la recepción y transmisión de la información
<u>IEEE 1588</u>	Establece el sincronismo entre los diferentes equipos que se encuentren en una comunicación.
<u>IEEE C37.118</u>	Sincronismo entre los fasores de los equipos de medición que se encuentren en un sistema de comunicación.
<u>IEEE P2030 y IEEE 1547</u>	Establece la interoperabilidad de los diferentes equipos de medición de la energía.
<u>ITU-T G.9955, ITU-T G.9956</u>	Establece la conexión y comunicación de los equipos de medición. Como emplearlos y cómo manejarlos.

ANSI C12.19, fue propuesta en el año de 1990, por el Instituto de Estándares Nacionales de América (ANSI), y es una normativa que detalla el intercambio de los datos obtenidos de los medidores inteligentes como debe de ser su envío a las empresas de distribución, en el caso del servicio eléctrico, ya que la norma también es aplicable a otros servicios. Esta norma establece que datos nomas deben de ser enviados como por ejemplo, la lectura, mansajes recibidos, configuración de los equipos, etc., pero esta normativa deja a un lado los protocolos de comunicación [6][14].

ANSI C12.18, esta normativa se refiere a la comunicación de los medidores, y para ello especifica dos tipos de modelos. El primero es donde existe una comunicación punto a punto actuando en la capa de aplicación del modelo OSI, una comunicación directa entre los medidores bajo la normativa ANSI, y los servidores bajo esta misma normativa; y la más usada es por medio de una medición de datos y enviada por una red óptica a los equipos de concentración, y de ahí a las bases de datos. Esta normativa en síntesis especifica la forma y el medio de envió la información, como se los envía y como le los va a adquirir

[6][38].

ANSI C12.21, es un estándar que detalla la forma mínima requerida para la comunicación entre los equipos de medición y los equipos que se encargan de procesar, analizar y almacenar los datos que son enviados, también aquí incluye todos los equipos necesarios para la comunicación, como es el caso de módems de acceso, equipos de conmutación, y routers para el acceso a las redes de comunicación, el tipo de comunicación que propone es punto a punto, en donde solo requiere medidores de lectura remota que incluya con equipos de autenticación [6].

ANSI C12.22, es la última versión expuesta para el transporte de los datos y de todo el proceso que se requiere para envío y recepción de la información, esto es detallado por la normativa ANSI C12.19. La normativa ANSI C12.22 es una integración de las normas ANSI C12.19 Y C12.21, pero la gran diferencia es la inclusión de los protocolos Ethernet, mensajes por GSM, o UDP/IP, comunicación serial para la automatización de los datos de los equipos de medida. En síntesis es una integración de estándares y protocolos de comunicación para medición inteligente [6][39][40][41].

IEEE 1588, este estándar debe de ser capaz de mantener una sincronización a través de una red de comunicación, una variante de este estándar es la eliminación del GPS de los diferentes equipos de medición. El gran inconveniente que posee este estándar es el retardo que existe en la recepción de los datos pero esto se soluciona por medio de una buena red de comunicación y que la topología usada sea totalmente flexible, por el número de switches, routers o concentradores de la infraestructura de red; por esto se usa las características básicas de la red TCP, o se implementa el estándar IEEE C37.118 [6].

IEEE C37.118, esta norma especifica la sincronización de fasores, es decir el cambio de sincronismo entre los fasorial de los medidores que se encuentren conectados al sistema de distribución; la IEEE C37.118, fue propuesto en el año de 1995, y revisado, reformado en el año del 2006. Una de las ventajas de esta normativa, es que define las reglas básicas para obtener los datos de los PMU, y son conocidos como concentrador de datos fasorial (CDP). La IEEE C37.118 se o

implementa en conjunto a los TCP/IP y a los UDP/IP, esta normativa de la IEEE tiene dos puntos característicos de funcionamiento, primero es la sincronización de los datos obtenidos por los PMU, una sincronización con los concentradores, el segundo es la integración de GPS, para tener un mejor manejo de la sincronización de los datos [6].

IEEE P2030 y IEEE 1547, son normativas que se encuentran en realización para el ámbito de la medición inteligente en el sistema eléctrico de potencia, tanto en las áreas de generación transmisión y distribución, como se debe de implementar las redes, cual va hacer el funcionamiento y la operación, las diferentes aplicaciones que deben de tener; estas normativas deben de reconocer la forma dinámica del sistema para una transmisión bidireccional, una interconexión de forma dinámica que exista una interacción de las cargas o consumidores finales, que puedan aportar al sistema y que no solo consuman energía; un control adecuado con interfaces de usuario para el monitoreo y control, la interoperabilidad de los diferentes dispositivos inteligentes [42].

ITU-T G.9955, ITU-T G.9956, detalla para la conexión de los equipos por medio de una red de Power Line Communications, con una frecuencia para la transmisión de 500 KHz, estos estándares son perfectos para sistemas de baja, media potencia, líneas de bajo y medio voltaje y todos los equipos que se encuentren en el sistema de distribución; puede ser utilizada tanto en zonas urbanas como en zonas rurales; estos documentos están enfocados principalmente en la capa física, es decir, específicamente para la comunicación del sistema [43].

A pesar de estas normativas internacionales, en otros países se trata de normas el uso de medidores inteligentes como es el caso de España se ha establecido varias normativas y las regulaciones pertinentes para los medidores eléctricos, como por ejemplo las leyes 2819/1998 y 1955/2000 norman las actividades tanto en el transporte y la distribución de la energía eléctrica estableciendo diferentes formas para la adquisición de la energía, en cambio las leyes 222/2008 y 325/2008 establecen las retribuciones a las diferentes actividades realizadas en la parte de distribución y transporte. En cambio la ley 661/2007 regula la generación y la implementación de producción de energía renovable tanto mayor a 10 MW y

menor a este valor citado [37].

1.4 Identificación de las zonas rurales con mayor índice de pérdidas no técnicas.

Para la identificación de los sectores, zonas con alto índice de pérdidas no técnicas, se debe de conocer en exactitud en consumo eléctrico de cada uno de las zonas y así establecer de forma adecuada las pérdidas que posee una zona; pero para determinar las no técnicas, se debe poseer un sistema que almacene el consumo de energía de los equipos que se encuentran instalados en el sistema de distribución, es decir conocer el verdadero consumo de potencia de transformadores, líneas de distribución, acometidas, alumbrado público, etc.

En el Ecuador para determinar las pérdidas totales se realiza el siguiente cálculo: la diferencia entre la disponibilidad de potencia aguas arriba y la entrega de potencia aguas abajo, con ello se puede tener las pérdidas de potencia por empresa de distribución, pero no se puede obtener el valor exacto de pérdidas técnicas y no técnicas. Ya que para calcular las pérdidas técnicas se realiza un análisis matemático y así conocer el consumo de los equipos involucrados en el sistema de distribución; y las pérdidas no técnicas se realiza una diferencia entre la demanda consumida y las pérdidas técnicas calculadas bajo el análisis matemático.

Pero para conocer las pérdidas por sectores o estratos, ya sea un sector urbano, rural, o sub-urbano, no se puede aplicar la definición anterior, ya que no se conoce cuál es el consumo de cada uno de los sectores, las empresas de distribución no poseen la tecnología necesaria para almacenar la demanda de los diferentes sectores.

Por lo tanto es difícil establecer cuáles son las zonas que poseen mayor pérdidas no técnicas; las empresas de distribución no poseen la información necesaria para establecer cuáles son las zonas de mayores pérdidas de energía eléctrica; es necesario mencionar que el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), anualmente presenta un informe el cual menciona cuales son las pérdidas totales, pérdidas técnicas y no técnicas de cada una de las empresas de distribución. Con todo lo ya detallado y mencionado, se presenta a continuación

una ilustración y una tabla en donde se pretende dar a conocer las pérdidas totales en el Ecuador.

Empresas de distribución	Potencia Disponible (Gwh)	Pérdidas Totales (Gwh)	Pérdidas totales (%)
CNEL-Los Ríos	368.7	99.77	27.06%
CNEL-Manabí	1,497.58	366.16	24.45%
CNEL-Esmeraldas	491.93	108.38	22.03%
CNEL-Sucumbíos	276.79	59.08	21.35%
CNEL-Milagro	635.93	118.47	18.63%
CNEL-Guayas Los Ríos	1,708.56	294.14	17.22%
CNEL-El Oro	874.53	139.16	15.91%
CNEL-Sta. Elena	517.75	86.39	16.69%
CNEL-Bolívar	75.78	7.98	10.53%
CNEL-Sto. Domingo	494.97	51.84	10.47%
E. de Guayaquil	5,150.22	625.37	12.14%
E.E. Riobamba	329.49	33.61	10.20%
E.E. Sur	306.03	34.47	11.26%
E.E. Norte	534.48	59.67	11.16%
E.E. Galápagos	39.52	2.99	7.56%
E.E. Ambato	567.61	35.18	6.20%
E.E. Cotopaxi	476.43	27.48	5.77%
E.E. Centro Sur	934.09	63.06	6.75%
E.E. Quito	4,154.14	251.74	6.06%
E.E. Azogues	103.35	5.01	4.85%

Tabla 1.2 Pérdidas de las empresas eléctricas de distribución

Fuente: [44] H. V. Orejuela, "BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA APLICACIÓN DEL PLAN DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN EL ECUADOR."

La tabla 1.2 muestra la disponibilidad de potencia de cada una de las empresas y cual es las pérdidas de las empresas de acuerdo a la disponibilidad pertinente.

En la gráfica podemos ver las perdidas tanto en Gwh y en porcentaje esto nos ayuda a identificar los sectores, para una mejor ilustración se agrupo las empresas que se encontraban en la misma provincia, por ejemplo se agruparon las empresas que se encontraban en Guayas y las empresas que se encontraban en Azuay. Esto ayuda a tener una mejor visualización de las pérdidas en la gráfica.

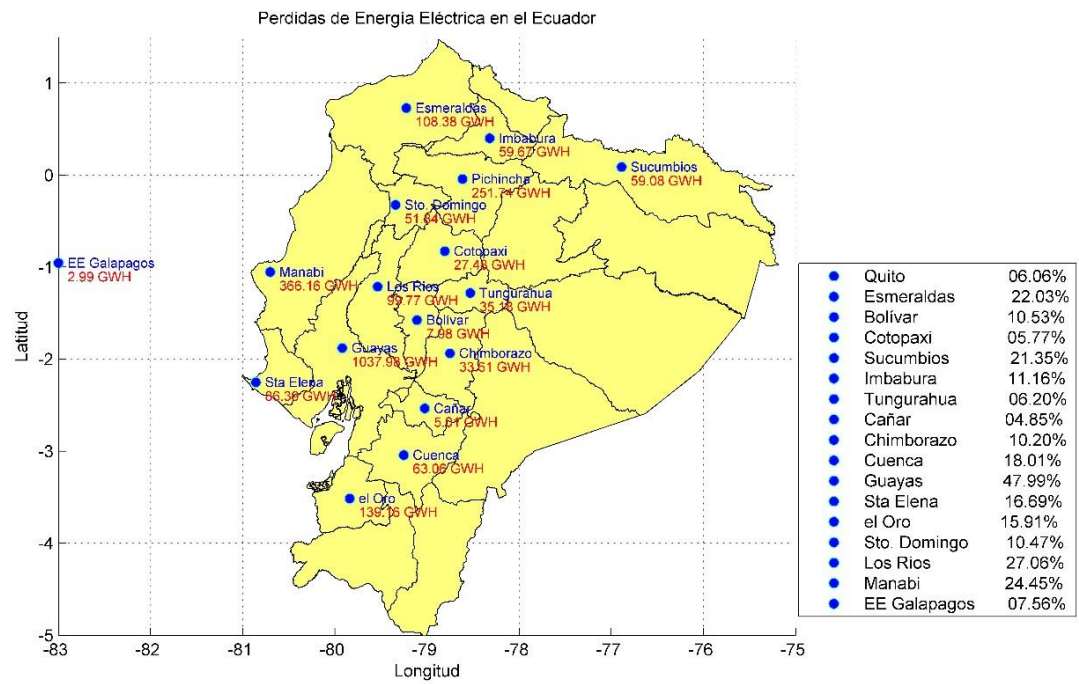


Figura 1.6. Pérdidas totales de Potencia

CAPÍTULO II

II. COMUNICACIONES INALÁMBRICAS EN ZONAS RURALES PARA AMI.

La comunicación juega un rol muy importante en la medición inteligente, ya que las comunicaciones es el medio por el cual podemos interconectar el control y el monitoreo con las redes eléctricas, tanto en la parte de distribución, transmisión y generación de la energía; por esto es necesario detallar las tecnologías inalámbricas que se pueden utilizar en zonas rurales. Por medio de las comunicaciones podemos almacenar los datos necesarios para mantener la estabilidad en el sistema; en este capítulo se detalla cada una de las tecnologías aplicables en zonas rurales, las variables y modelos para el análisis de las redes.

2.1 Tecnologías de telecomunicación inalámbrica para zonas rurales

La tecnología inalámbrica posee varias ventajas a comparación de la tecnología alámbrica, por ejemplo una red inalámbrica su instalación es más rápida, más versátil, más flexible, lo que hay que tener en cuenta en una red inalámbrica es su área cobertura. Cuando se usa una red inalámbrica también se debe de tomar en cuenta el espectro que se piensa utilizar ya sea un espectro licenciado o no licenciado, para ello va a depender de las características de conexión, la distancia de envío de los datos y que tan saturado se encuentra es espectro radioeléctrico.

Para que se pueda implementar una red inalámbrica debe de existir características básicas de operación; como cobertura, capacidad, velocidad de envío y recepción, seguridad de la información, una comunicación eficiente en tiempo real. Cada tecnología posee características propias, estándares propios de comunicación, es importante que la red inalámbrica cumpla con cada una de las características ya que esta red es el medio por el cual se va a recibir, enviar la información; es decir, que la red inalámbrica es el puente entre los medidores y las empresas de distribución. Existen varias redes que se pueden aplicar en zonas rurales, con la finalidad de poder para realizar una medición inteligente eficiente y confiable y segura [36].

La red celular es una red inalámbrica con una gran cobertura, y la cobertura es dada por una estación base, esta estación base da servicio a todos los usuarios

móviles que se encuentren en su rango, existe una gran desventaja al usar una red celular, y es la saturación de los canales; mientras mayor número de usuarios se encuentren conectados a la estación base, los canales se saturan y empieza a existir las pérdidas de señal en varios equipos. Una red celular se encuentra dividido en canales, y estos canales se producen interferencias entre sí, y esta interferencia produce ruido en los canales, una de las ventajas de usar redes celulares es la velocidad de transmisión de datos y el gran avance tecnológico que existen en estas redes en los últimos años. Una de las ventajas de usar una red celular para la implementación de un sistema de medición inteligente, es el bajo costo en la infraestructura, ya que las estaciones base, las antenas ya existen, y poseen una gran área geográfica, ya que se encuentra distribuida por muchos sectores [36][6].

Si se utiliza la red celular como interconexión, hay la gran posibilidad de la saturación de los canales de la red celular por ese motivo, es de gran importancia que los medidores entre a usar el espectro como usuarios secundarios, pero para esto debe de existir un operador móvil virtual de red (MVNO), el MVNO tiene la capacidad de verificar que canales se encuentran libres a asignarles estos canales a los medidores para que así puedan enviar o recibir información de las empresas de distribución, el MVNO es fundamental para no congestionar la red, uno de los puntos característicos del uso de un MVNO es la reducción de costos en la utilización de una red celular, ya que solo se factura los canales usados y no todo el espectro, también que los operadores primarios tendrán una buena cobertura ya que no se les satura los canales y el envío de la información será de totalmente segura y confiable [45]. Otro punto importante es el uso del Operador móvil virtual cognitivo (C-MVNO) este operador a diferencia de un MVNO, arrienda el espectro disponible y que sea necesario para el envío de la información, es decir que solo cuando se requiere de un espectro el C-MVNO se encargara de las verificaciones pertinentes de la disponibilidad del espectro extra para arrendarlo y así minimizar el uso del espectro [46].

El gran avance que ha tenido las redes celulares en estos últimos años, ha hecho que se opte por la utilización en la medición inteligente; desde una segunda

generación con costos más efectivos y mayor ubicación en el mercado, aquí intervienen dos tecnologías que hicieron la posibilidad de pensar en utilizar redes celulares GSM, de las siglas Global System for Mobile phone communications es el primer estándar en usar tecnología digital esta tecnología es más usada para envío de datos en distancias cortas y CDMA que es una de las tecnologías que se pretende usar para la medición inteligente por el hecho de que puede enviar la información a largas distancias [47]. En la tercera generación es una actualización de las tecnologías GSM, y CDMA con acceso a HSPA y EV-DO, y con la llegada de la cuarta generación tecnologías con mayor versatilidad como es WIMAX y LTE, por estas razones se ha optado en su implementación en la medición inteligente. Cada una de las tecnologías citadas tienen características básicas de operación por eso se menciona a continuación aquellas que son favorables en zonas rurales [48].

a) *CDMA, (acceso múltiple por división de código)*

CDMA, proviene de las siglas Code Division Multiple Access, esta tecnología fue implementada en la segunda generación de las redes celulares, utiliza métodos de multiplexado y codificación para el envío de la información, y una vez ya codificado utiliza el método expandido para la transmisión de la información desde el emisor al receptor de los datos. Como ya se mencionó CDMA es proveniente de la segunda generación con CDMA ONE y es adaptada, mejorada en la tercera generación en CDMA2000 y CDMA450. CDMA requiere de códigos de acceso que se necesitan para poder enlazar la comunicación, estos códigos son proporcionados, a los usuarios de forma automática, y la información es codificada de acuerdo al código emitido para el enlace, con esto se mejora la seguridad ya que solo los portadores de los códigos podrán obtener la información. La velocidad de transmisión, su área de cobertura y la distancia de propagación va a depender al tipo de tecnología que se esté implementando, la tecnología que sobresale es la CDMA450 y la CDMA2000, CDMA, puede combinarse con otras tecnologías para mejorar su servicio como es el caso de la comunicación satelital que trabaja bajo la frecuencia [49][50].

del orden de 11,7 a 14,5 GHz, esta es muy sensible a cambios climáticos e interferencias, y por tal razón se le combina con la tecnologías CDMA para mejorar la transmisión de datos y mitigar las interferencias, la gran desventaja es que su implementación es más costosa ya que se está implementando dos tecnologías para mejorar el servicio [51][52].

Para realizar una comunicación el emisor por medio de un código, este código se le conoce como código de expansor o PN, cada usuario posee un código diferente para la transmisión, este código contendrá la información que se envía, el receptor solo podrá tener acceso al código enviado para ese usuario, mientras que los otros códigos a pesar de estar en la misma banda solo le detectara como ruido. La codificación de la información que se va a enviar se lo realiza por medio de funciones ortogonales, por esta razón el receptor solo puede acceso al para ese usuario. Una de las ventajas que posee la tecnología CDMA, es que es un dominio misto o hibrido ya que trabaja tanto en el dominio del tiempo y de la frecuencia es una combinación de las tecnologías TDMA y FDMA [53][54]. Una tecnología TDMA se refiere a una asignación de los canales por instantes de tiempo, esta asignación se le realiza todos los equipos que se encuentren bajo la zona de cobertura de la tecnología, el TDMA es más usado por la tecnología satelital y GSM; para evitar exista interferencia entre las zonas comprendidas existe un tiempo de guarda. Mientras que una tecnología FDMA, es una asignación por frecuencia, es decir, que divide su ancho de banda por tramos de frecuencia a cada uno de los usuarios que tengan cobertura; las aplicaciones más usuales de esta tecnología es las repetidoras satelitales y aquellas comunicaciones que todavía son transmitidas de forma analógica, al igual que en el TDMA, en FDMA existe una banda de guarda para evitar las interferencias entre divisiones; en las imágenes se detalla de mejor manera las divisiones tanto de TDMA como de FDMA [52][55].

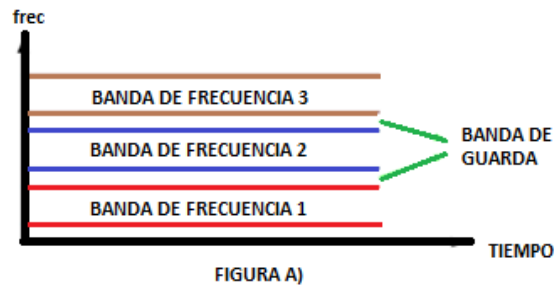


Figura 2.1. Figura a) acceso múltiple por división de frecuencia; Figura b) acceso múltiple por división de tiempo.

Fuente: [52] G. Ruiz and J. Hermenegildo, "Aplicación de los sistemas VSAT a regiones remotas del territorio Nacional,"

La tecnología CDMA, posee características primordiales para una buena operación, entre estas características podemos mencionar las siguientes:

- Posee una gran privacidad y seguridad ya que por medio de la codificación, solo el emisor y receptor pueden conocer los datos que se transmiten, es decir que ninguna otra persona particular puede descifrar la información ya que no conoce su codificación.
- CDMA no posee atenuación o distorsión de la información transferida gracias a compartición de los canales y a su forma ortogonal.
- Ensanchamiento de la información por Espectro expandido y modulación multi-portadora, trata de optimizar el ancho de banda disponible, reduciendo la potencia que se va a transferir pero sin afectar la calidad de la comunicación, el espectro expandido consiste en distribuir las señales por todo el espectro comprendido esto se lo hace con facilidad gracias a la codificación mencionada, y se tendría una señal unificada pero con características propias gracias a los códigos PN; en cambio el receptor gracias al mismo código PN puede decodificar la información que se le

transmitió desde el emisor y así conocer solo la información requerida para el receptor; en cambio una modulación multi-portadora es una demultiplexación de la información y se le transmite de forma separa, codificada pero no agrupada, es decir de forma individual por el ancho del canal.

- Flexibilidad, es una de las ventajas de la tecnología CDMA, ya que no se requiere un sincronismo para la comunicación, ya que por medio de los códigos PN se puede entablar una comunicación sin ningún inconveniente [56].

La tecnología más avanzada que posee CDMA es la CDMA 450, esta tecnología está basada bajo el estándar CDMA 2000, se puede decir que el CDMA 450 es la aplicación del estándar mencionado.

CDMA 2000, es un estándar de comunicación, su origen fue en la tercera generación, una de las grandes ventajas de este estándar es la posibilidad de comunicarse con tecnologías predecesoras a la CDMA2000, la velocidad de transmisión que posee este estándar va a estar determinado por las diferentes versiones que posee. Este estándar de comunicación tiene varios tipos de comunicaciones, cada uno de ellos es una modificación y actualización del estándar básico, entre los más destacados tenemos a los siguientes; CDMA2000 1x la gran característica de esta tecnología es la duplicación de la velocidad de transmisión de voz, CDMA2000 1xEV-DO (evolution data optimized) la características de esta versión es la alta velocidad de transmisión tanto para envío como para recepción, CDMA2000 1xEV-DV (evolution data/voice) posee las mismas características que el CDMA2000 1xEV-DO pero incorpora a ventaja de poder enviar y recibir los datos al mismo tiempo pero en alta velocidad; cada una de ellas son interfaces que se destacaron por su velocidad de transmisión y la seguridad que poseen. Cada una de las versiones tiene su propia velocidad tanto de subida como de bajada, en la siguiente tabla se menciona las velocidades de cada una de las tecnologías para CDMA2000 [57][58].

Tecnología	Velocidad de bajada	Velocidad de subida
CDMA2000 1x	307 Kbps	307 Kbps
CDMA2000 1xEV-DO Rev. 0	2.4 Mbps	153 Kbps
CDMA2000 1xEV-DO Rev. A	3.1 Mbps	1.8 Mbps
Tecnología	Velocidad de bajada	Velocidad de subida
CDMA2000 1xEV-DO Rev. B	14.7 Mbps	4.9 Mbps
CDMA2000 1xEV-DV	3.1 Mbps	1.8 Mbps

Tabla 2.1. Velocidades de transmisión de CDMA2000

Fuente: [59] C. Añazco, "Diseño Básico de Redes de Acceso FTTH utilizando el estándar GPON,"

CDMA2000 como cualquier medio de comunicación está regido bajo las capas OSI para tener un mejor manejo y control de la información; las capas en las cuales trabaja CDMA2000 son las que se muestran en la siguiente ilustración.

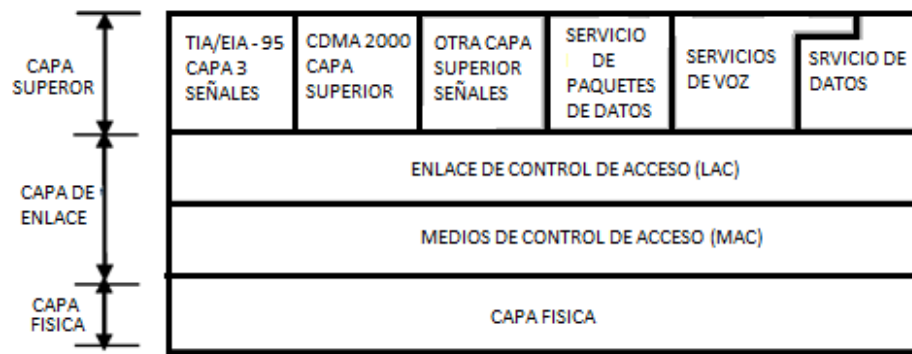


Figura 2.2. Modelo OSI para CDMA2000

Fuente: [56] A. Araujo, "Evaluación de la Aplicabilidad de la tecnología CDMA 450 en el AUSTRO Ecuatoriano Mediante la Utilización de un Modelo Basado en Sistemas de Información Geográfica,"

Como se puede verificar en la ilustración CDMA2000 trabaja en las capas superiores, capas de enlace y en la capa física del modelo OSI; cada una de estas capas realizan una función específica, que en conjunto realizan la integración de las operaciones del modelo OSI. En las capas superiores tenemos varios servicios que brinda esta capa; servicio de voz y datos, a los clientes diferentes clientes una interacción entre móviles o fijos para la comunicación y transmisión de datos; control en el envío de mensajes; verificación desde las estaciones base hacia los dispositivos móviles por medio de estados de uso de los canales como, estado de

iniciación, estado de inactividad, de acceso a los sistema, control de tráfico y estado de registro. En cambio en la capa de enlace se encarga de la trasmisión de la información, comprueba, verifica y controla el medio por el cual se va a enviar los datos, es decir que esta capa monitorea el transporte de los datos con la finalidad de brindar un servicio de calidad (QoS) a los clientes, uno de los aspectos importantes de la capa de enlace es el monitoreo y rastreo de la información que es enviada por cada uno de los servicios que brindan las capas superiores; por ese motivo la capa de enlace se la divide en dos partes.

- Control de acceso por enlace (MAC)
- Control de acceso al medio (LAC)

La sub-capa MAC, nos referimos al control, al monitoreo y a la administración de todos los canales físicos ya codificados, la recepción de la información, coordinación de esta información para luego enviarla a la sub capa LAC. Para poder tener el control de estos recursos necesita de funciones de convergencia tanto independientes como dependientes; las funciones de convergencia independientes solo se encargan de conocer el estado de los servicios que se encuentran brindando, mientras que los dependientes se encargan del rastro de los canales, multiplexado y demultiplexado de los datos ya codificados que son enviados de la capa física. La capa física en cambio se encarga de la codificación de la información, del ensanchamiento de la información ya sea por Espectro expandido y modulación multi-portadora.

A pesar de toda la información que maneja CDMA2000, su longitud en tramas es sumamente rápida, ya que para el control de la información de los canales posee una velocidad de 5 a 20 ms, mientras que para transmitir la información, los datos de los clientes son de 20 ms.

Como ya se mencionó CDMA 450 es la aplicación del estándar, CDMA 450 es una renovación de la tecnología ya dicha, ya que es un avance de las comunicaciones análogas, por su incorporación de enlaces digitales, CDMA 450 posee todas las características en velocidad y en seguridad, se basa principalmente en CDMA2000 1XEV-DV. Los equipos que poseen esta tecnología tienen una buena cobertura, una buena propagación de las señales, y una buena

seguridad en la transmisión de la información. CMDA 450 posee características que se detallaran a continuación.

Propagación, es mejor que en otras bandas de frecuencia, por eso posee mayor propagación de la señal, y por ende tiene una mejor cobertura y puede brindar un mejor servicio, para un mejor detalle y mejor comparación de las frecuencias, en la siguiente tabla se detalla la propagación.

Frecuencias (MHz)	Radio de Celda (Km)	Área de celda (Km ²)
450	48.9	7521
850	29.4	2712
1900	13.3	553
2500	10	312

Tabla 2.2 Comparación de la propagación y cobertura de las frecuencias
Fuente: [60] D. Uribe, "USO DE LA BANDA 450 MHz CON LA TECNOLOGÍA DE ACCESO MÚLTIPLE POR UNIVERSAL,"

Al tener una mejor cobertura, esto hace que exista grandes beneficios, para brindar un servicio en una zona rural se requerirá la implementación de menos equipo, una disminución de las estaciones base ya que su área de cobertura es mayor; esta disminución de la infraestructura también está asociado con la reducción de costos tanto para la operación, implementación y por mantenimiento.

Control de la Potencia, el control de la potencia es fundamental para cualquier tecnología CDMA, CDMA realiza un proceso de codificación y estos datos codificados de todos los usuarios usan todo el espectro en su totalidad, por eso debe de tener un control de la energía que se encuentra dispersa para que la información no sea afectada por variaciones en los límites de cobertura de las estaciones base, con un adecuado control de a potencia, también se tiene una optimización de los recursos para las transmisiones que se deben de efectuar, ya que la optimización de los recursos conllevan a un adecuado nivel de servicios para cada uno de los usuarios.

La recepción es uno de los puntos básicos de operación de CDMA 450, ya que para recibir la información utiliza unos receptores, cada uno de ellos capta las señales que se van a transmitir, cada receptor posee varios captadores de

señales, con la finalidad de tener mayor posibilidad de captar más señales y que el receptor contenga la mayor cantidad de datos a transferir.

CDMA 450 posee varias características aparte de las ya mencionadas como por ejemplo; en CDMA no existe variaciones de frecuencia, esto hace que no exista perdidas de datos, perdidas de llamadas, interrupciones en las comunicaciones, interferencias entre canales, ya que cada usuario para la comunicación utiliza códigos para enlazarse; estas características hacen que CDMA 450 tenga una buena operación y pueda brindar un mejor servicio a los clientes y que el espectro pueda ser reutilizado para incorporar nuevos servicios como tele-medicina, internet y medición inteligente [60].

CDMA450 posee varias sub-bandas para mejorar las operaciones descritas anteriormente, estas categorizaciones de la tecnología CDMA450 fueron revisadas y propuestas por la Asociación Internacional para el uso exclusivo del ancho de banda de 450 MHz, AI 450; con esto para la tecnología CDMA450 con un ancho de banda de transmisión de 1.25 MHz de cada una de las bandas portadoras, las sub-bandas de transmisión va a estar descrita en la siguiente tabla.

Sub- bandas	Bandas de frecuencias de transmisión (MHz)	
	Estación móvil	Estación base
A	452.5 – 457.47	462.5 – 467.47
B	452.0 – 456.47	462.0 – 466.47
C	450.0 – 454.8	460.0 – 464. 8
D	411.67 – 415-85	421.67 – 425.85
E	415.5 – 419.97	425.5 – 429.97
F	479.0 – 483.48	489.0 – 493.48
G	455.23 – 459.99	465.23 – 469.99
H	451.31 – 455. 73	461.31 – 465.73

Tabla 2.3. Sub-bandas de CDMA450

Fuente: [60] D. Uribe, “USO DE LA BANDA 450 MHz CON LA TECNOLOGÍA DE ACCESO MÚLTIPLE POR UNIVERSAL,”

b) Wimax, (Interoperabilidad mundial de acceso por microondas)

Wimax, proviene de las siglas Worldwide Interoperability Microwave Access, Wimax está bajo el estándar 802.16 y es una tecnología de cuarta generación, posee una gran conectividad con los usuarios, las distancias de conexión son de

varios kilómetros, es decir que tiene un buen rango de cobertura, posee un buen ancho de banda para la transmisión de datos, y una encriptación fuerte para la seguridad de la información; Wimax fue establecido para la conexión de gran capacidad de usuarios por medio de la tecnología OFDMA, la gran característica de esta tecnología es que para él envío de la información no consume mucha potencia y puede acceder a varias aplicaciones. Wimax puede operar tanto en bandas licenciadas como no licencias; Wimax es tan eficiente que puede ser incorporado como tecnología fija o tecnología móvil; por sus rangos de cobertura y la flexibilidad que posee, Wimax es ideal para brindar servicios en zonas rurales [61][62].

c) *LTE, (Tecnología Long Term Evolution)*

LTE, proviene de las siglas Long Term Evolution, es una tecnología de cuarta generación, es una migración de las tecnologías de tercera generación, posee mayor flexibilidad en el envío de datos, con un ancho de banda de alrededor de 180 KHz, esto provoca una gran mejora tanto en la transmisión, en la calidad del servicio brindado y el uso de la red, del espectro. Una de las ventajas de usar LTE, la facilidad de pasar datos a las diferentes tecnologías de segunda o tercera generación. El principal objetivo de LTE es disminuir la latencia en las conexiones, aumentar la velocidad en la transmisión de la información [63][64].

LTE trabaja bajo las dos arquitecturas E-UTRAN y UTRAN, existe una gran diferencia entre las dos arquitecturas; E-UTRAN, posee una topología jerárquica, en esta arquitectura existe una conexión entre estaciones base, y los controladores, la gran ventaja de esta arquitectura es que entre controladores existe comunicación; pero en cambio en una arquitectura UTRAN [64][65], la topología es jerarquizada, es decir que la forma de la topología es estrella, en donde solo existe conexión entre las estaciones base con los controladores y no entre ellos, de ahí la forma de envío de información y las características de operación son las mismas [66]. Aparte de esto LTE utiliza la capa física PHY, las tramas que posee LTE tiene una duración no mayor a 10 ms. Cada trama consta de 20 partes o periodos con un tiempo de duración de entre 0.5 ms. Pero LTE usa dos tipos de tecnologías para realizar downlink y uplink [63]:

- OFDMA (acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal), esta división se la realiza dependiendo del número de sub-bandas se necesite, cada sub-banda va a poseer una velocidad de transmisión, esta velocidad va a depender de los servicios que se van a alojar bajo la sub-banda; cada sub-banda realiza un codificación de la información para evitar errores en la información. OFDMA es una tecnología muy parecida a CDMA, la gran ventaja que posee OFDMA es la reducción de las interferencias en las conexiones y aumento en la velocidad de transmisión [63][66]. Esta tecnología se basa en CSMA para la multiplexación de la información, utiliza la capa física PHY. OFDMA en LTE es usado para recibir información downlink, y para ello trabaja bajo el rango de operación de bandas de 1,25 a 20 MHz, y puede soportar 12 portadoras con un tiempo de transferencia de 0.5 ms. Por portadora, a continuación se detalla en la siguiente tabla las especificaciones de LTE/OFDMA [63].

Ancho de banda (MHz)	1.25	2.5	5	19	15	20
ancho de banda de sub-portadora (KHz)	15					
bloque de recursos físicos (PRB) Ancho de banda (KHz)	180					
Número de PRB disponibles	6	12	25	50	75	100

Tabla 2.4. Bandas para downlink en LTE con tecnología OFDMA

Fuente: [63] X. Paredes, "Propuesta para la implementación de la tecnología UMTS Long Term Evolution en la ciudad de Guayaquil,"

- SC-FDMA (acceso múltiple por división de frecuencia portadora única), una señal enviada por SC-FDMA, puede ser trabajada tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia; la forma en la que transmite SC-FDMA es casi similar a la de OFDMA, la gran diferencia es que SC-FDMA solo posee una portadora, no es multiportadoras [63][66]. Se usa SC-FDMA para

enviar la información es decir uplink, ya que OFDMA posee muchas desventajas para el envío de información por ser multiportadoras. Esta tecnología posee las mismas características de banda que OFDMA, tiene el mismo rango de banda de 1.25 a 20 MHz, con un total de 12 sub-portadoras con una frecuencia de 15 KHz por sub-portadora; la gran diferencia que posee entre OFDMA y en SC-FDMA, es la forma en que están integradas las sub-portadoras, en OFDMA posee una sub-portadora central esta sub-portadora no se usa para mitigar las interferencias y en cambio en la tecnología SC-FDMA es un conjunto de sub-portadoras continuas, es decir que no existe una sub-portadora central, ya que para mitigar las interferencias usa una pre-codificación, y esta pre-codificación se basa en DFT, y así las interferencias quedarían dispersas en todo el ancho de banda y no es tan perjudicial la interferencia de esta manera [66].

Tanto en OFDMA y en SC-FDMA las dos pueden producir distorsiones en las trayectorias de la información, aparte de ello LTE usa OFDMA para downlink la información, mientras que SC-FDMA es más para el envío de la información es decir uplink. Tanto LTE como Wimax son provenientes de la cuarta generación de la tecnología celular, LTE posee las mismas características que Wimax en el funcionamiento y como opera; la gran diferencia es el enfoque que tienen cada una LTE es más para servicios requeridos en zonas urbanas y Wimax tiene más acogida para servicios en zonas rurales [66].

d) White Space, (Tecnología de alta frecuencia VHF, UHF, HF)

Así como la red celular, el espectro de las redes de alta frecuencia como son UHF, VHF y HF que son utilizadas para brindar los servicios de televisión se puede utilizar para brindar servicio de medición inteligente, para ello se reutiliza el espectro que deja libre las señales de televisión; tiene el mismo concepto que la reutilización de las tecnologías celulares, pero este tipo de espectro solo se puede plantear en zonas rurales; por ese motivo se especifica el uso de este tipo de espectro [67].

Una tecnología de TV White Space requiere de varios factores para su implementación como por ejemplo espectro del censado, una modulación del tipo

OFDMA entre otros factores; estos factores se establecen en la sección 2.4 de este capítulo. La tecnología TV White Space el espectro en el cual se puede implementar está en el rango de 54 a 862 MHz, 1 canal puede dividirse en varias sub-portadoras pero para el uso del espectro se debe tomar mínimo 2 sub-portadoras para evitar que se produzca ruido en la comunicación [68]. El censado del espectro se encarga C-MVNO con la finalidad de encontrar su disponibilidad y sin la necesidad de que exista la intervención entre los operadores primarios con los operadores secundarios [69].

2.2 Variables que deben ser analizadas en redes inalámbricas para zonas rurales

Las redes inalámbricas poseen varias variables que se deben de tomar en cuenta para la implementación para brindar un servicio, cada variable puede modificar la calidad del servicio, cada una puede ayudar a mitigar cualquier variación que se presente en las tecnologías inalámbricas. Para ello se ha tomado las variables que afectan la calidad del servicio de las redes inalámbricas y principalmente en zonas rurales, como son la propagación, cobertura, control de la potencia y energía, la ganancia de los equipos que se piensa usar, capacidad de la tecnología, el delay o latencia que se puede presentar en las redes inalámbricas. La latencia es referida como el tiempo que se demora en el envío de la información.

a) Coberturas

La cobertura es uno de factores o variables a tomar en cuenta cuando se desea usar un tipo de infraestructura para brindar un servicio determinado, para ello es fundamental conocer los factores que pueden causar variaciones en los rangos de cobertura de cada uno de los equipos. Por lo tanto la cobertura va a estar sujeta a las restricciones de la propagación ya sea en una línea de visión despejada o en una línea de visión con obstáculos, en la potencia de los equipos, y la capacidad del sistema [70].

b) Propagación

La propagación es una variable que se debe de tomar en cuenta cuando hablamos de comunicaciones inalámbricas y más aún si se pretende usar para

brindar un servicio como lo es la medición inteligente, la propagación va a depender de varios factores como la potencia de los equipos, la distancia entre las diferentes antenas. La propagación va a depender del medio en donde se encuentre, es decir, un espacio libre en donde no existe objetos que interfieran en la transmisión, donde no exista ningún agente entre las antenas; y un espacio con obstáculos donde la trayectoria de la señal se vea obstaculizada por cualquier objeto y que la señal tenga que cambiar de trayectoria. Cuando existe obstáculos en el medio se presentan reflexiones de la señal como las siguientes [70][71].

Reflexión de la señal, cuando una onda que incide sobre una superficie, esta onda tiene la posibilidad de reflejarse, perderse en la superficie, todo va a depender de la contextura física del material y de las propiedades de la onda. Desvanecimiento de la señal, esto ocurre cuando una señal es reflejada, la trayectoria de la señal varía, su potencia, su amplitud, por lo que cuando llega a la antena receptora las características de la señal son inferiores con una señal que se transmitió de forma directa. Penetración, es una transmisión directa en la cual la señal pasa por un obstáculo pero una parte de la señal es refractada y la otra atraviesa el obstáculo, existe pérdidas de señal, de potencia, de amplitud pero la señal llega a la antena receptora. Difracción de la señal, cuando no existe penetración de la señal, toda la señal cambia su trayectoria, cambia el sentido de envío en su totalidad. Dispersión de la señal, cuando no existe penetración de la señal, pero en cambio la señal es dividida en múltiples señales, cada una con diferente trayectoria, diferente amplitud, diferente potencia. A pesar de ello también existen otros factores que modifican las características de la señal como la atenuación, interferencias, por ese motivo la propagación es uno de los elementos fundamentales para una comunicación inalámbrica [70].

c) Control de potencia

La finalidad del control de potencia es de mantener la estabilidad del canal ya que en cada uno de los canales existen variaciones de potencia; Para CDMA el control del canal es crucial para mantener su estabilidad y por la eficiencia de los canales. Existen dos tipos de control de potencia, un control abierto de potencia y un control cerrado de potencia. El control de potencia abierto, es de menos

eficiencia ya que se asume un valor estándar para la ganancia del canal, esto puede concluir con potencia extremadamente variables, las potencias son variantes en el tiempo y puede producir un desperdicio de energía para la transmisión de los datos. Pero en cambio cuando se menciona un control de potencia cerrado, es un control con mayor eficiencia ya que existe una comparación entre la potencia suministrada y la potencia final del canal a esto se lo conoce como una retroalimentación, esta retroalimentación nos ayuda a que la ganancia sea ajustable y que al variaciones de potencia sean mínimas, y que exista una potencia deseada en cada uno de los canales con la finalidad de mantener estable a cada uno de los canales. Pero cuando se habla de un control de potencia cerrado se debe de mencionar dos tipos de control; un control de potencia cerrado centralizado, es uno de los controles de potencia más difíciles de efectuar ya que se necesita obtener la mayoría de valore de potencia de cada uno de los usuarios de los canales para estabilizarlos al mismo tiempo con una potencia única para todos los canales y un control de potencia distribuido es un control local en donde solo se requiere la potencia de los usuarios albergados en cada canal y así calcular una potencia para cada uno; este tipo de control en más eficiente y estable [55].

d) *Ganancia de los equipos*

La ganancia está totalmente relacionado con la potencia que pueda brindar sin afectar la calidad del servicio que se piensa suministrar, por ese motivo se piensa que con una ganancia desmesurada la información que se piensa transmitir puede convertirse en ruido, lo que afectaría con los datos que se obtuvieron de los diferentes equipos, por ese motivo la ganancia va a estar dada por el control de potencia, mientras mejor sea el control la ganancia va a estar totalmente controlada y en los valores limites en los cuales puede operar sin la necesidad de preocuparse de las perdidas por un exceso de potencia [56].

e) *Capacidad de la tecnología*

La capacidad es una variable importante que se debe de tomar en cuenta cuando se planea utilizar como medio de comunicación, ya que si se excede la capacidad que el sistema pueda soportar esta necesita ampliar la zona de

cobertura implementando nuevos equipos para albergar todos los usuarios que necesitan utilizar el servicio. Por ese motivo para calcular la capacidad se requiere de variables propias de cada tecnología que se piense implementar. Un ejemplo muy claro sobre la capacidad como variable es en la tecnología CDMA, para saber la capacidad de la celda o canal se requiere conocer los siguientes datos [56]:

P = Potencia del equipo

E_b = Energía por bit

B_c = Ancho de banda de la señal

F_{data} = Tasa de bits de la transmisión

I = Potencia de interferencia

G_p = Ganancia

N_o = Ruido por bit

Cada uno de las variables citadas es necesarias para el cálculo de la capacidad y de la ganancia, a continuación se determina cada uno de esos valores.

$$E_b = \frac{P}{F_{data}} \quad (1)$$

$$N = \frac{I}{B_c} \quad (2)$$

$$G = \frac{B_c}{F_{data}} \quad (3)$$

$$I = (N - 1) * P \quad (4)$$

$$N = 1 + \frac{P}{E_b N_o} \quad (5)$$

Fuente: [56] A. Araujo, "Evaluación de la Aplicabilidad de la tecnología CDMA 450 en el AUSTRO Ecuatoriano Mediante la Utilización de un Modelo Basado en Sistemas de Información Geográfica,"

Las Ec. (1), (2), (3), (4), (5) calcular la capacidad de la tecnología CDMA, con eso se puede confirmar cada una de las variables mencionadas anteriormente, y como la variación de cualquiera de ellas puede afectar con la comunicación de los equipos, unas de las variables cruciales a controlar ya que estas pueden afectar

con la calidad de servicio es la interferencia y el ruido que se puede producir por el aumento de la ganancia de cada uno de los equipos.

2.3 Modelos para análisis de las redes inalámbricas en zonas rurales

Por medio de aproximaciones matemáticas se puede determinar qué modelo es adecuado para su implementación, esto va a depender de diferentes factores; por estas razones los modelos que existen nos ayudan a determinar cómo se van a comportar las señales, cómo va a hacer su propagación y las pérdidas que pueden aparecer en la difusión de las distintas señales; estos modelos nos ayudan principalmente a conocer el comportamiento de los canales, con la finalidad de poder configurar los diferentes equipos que se requieren para la comunicación [72].

A estos métodos se los puede clasificar en 3 tipos fundamentales, cada uno con diferentes aplicaciones, esta clasificación se la realiza por la forma de propagación de las señales; estos tipos son los siguientes:

- Modelos empíricos
- Modelos deterministas
- Modelos semi-empíricos

Los diferentes modelos se los puede comprender de una mejor manera en la siguiente figura.

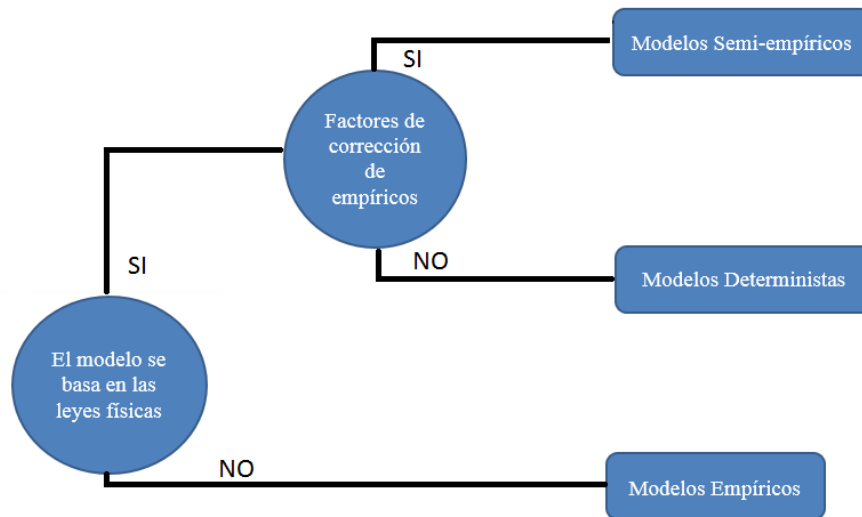


Figura 2.3. Modelos de análisis para modelos de propagación

Fuente: [72] J. Pradilla, "W-Spaces TV Tecnología de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN," Modelos empíricos

a) Modelos empíricos

Los modelos empíricos necesitan de datos estadísticos, estos datos son

obtenidos de diferentes formas, dependiendo de los datos que se tenga disponibilidad; mientras mayor cantidad de datos estadísticos que se posea, mejor será la determinación de los resultados por estos métodos, mayor exactitud, mayor precisión. Existen varias clases de métodos determinísticos que podemos encontrar, pero entre los más destacados tenemos los siguientes: Okumura, Okumura-Hata y el Cost 231 [72].

Modelo de propagación Okumura, este modelo fue desarrollado en Japón, es uno de los modelos más usados para la simulación de sectores urbanos, los factores que influyen en este método son: el grado de población, las irregularidades del medio, la ubicación de las antenas, la frecuencia a la cual debe de ser simulada debe de ser mayor a 150 MHz. El modelo Okumura da origen a modelos más específicos y más simples de usar, y que son especialmente detallados para redes celulares, como es el caso de los dos métodos Okumura- Hata y el Cost 231. Su formulación matemática es la siguiente [72][73]:

$$P_L(dB) = L_F + A_{mu} - G(h_T) - G(h_R) - G_{area} \quad (6)$$

$$G(h_R) = 10 \log \frac{h_T}{3} \quad \text{para } h_T < 3 \text{ m} \quad (7)$$

$$G(h_R) = 20 \log \frac{h_T}{3} \quad \text{para } 3 \text{ m} < h_T < 10 \text{ m} \quad (8)$$

$$G(h_R) = 20 \log \frac{h_T}{200} \quad \text{para } 30 \text{ m} < h_T < 100 \text{ m} \quad (9)$$

$P_L(dB)$ = pérdidas en propagación en dB

L_F = Atenuación por espacio libre

A_{mu} = Atenuación relativa promedio

$G(h_T)$ = Ganancia de la altura de la antena transmisora

$G(h_R)$ = Ganancia de la altura de la antena receptora

G_{area} = Ganancia debido al tipo de ambiente

Fuente: [72] J. Pradilla, "W-Spaces TV Tecnología de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN," Modelos empíricos

Modelo de propagación Okumura-Hata, es una variación del modelo anterior, pero este modelo es más usado ya que involucra tanto a zonas urbanas, suburbanas y rurales, es modelo es más empírico, más practico que el anterior; la

formulación matemática está dada a continuación [72][74].

$$P_L(dB) = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_T) - a(h_R) + (44.9 - 6.55 \log(h_T)) \log(d) \quad (10)$$

$$\text{Para zonas suburbanas } P_{L2}(dB) = P_L(dB) - 2 \log \left(\frac{f}{28} \right) - 5.4 \quad (11)$$

$$\text{Para zonas rurales } P_{L3}(dB) = P_L(dB) - 4.78(\log(f))^2 + 18.83 \log(f) - 40.94 \quad (12)$$

$P_L(dB)$ = pérdidas en propagación en dB

f = frecuencia de la portadora MHz

$h_T \equiv$ altura de la antena transmisora en m

$h_R \equiv$ altura de la antena receptora en m

d = distancia entre trasmisor y receptor en Km

$a(h_R)$ = factor de corrección por la altura efectiva del receptor

Fuente: [72] J. Pradilla, "W-Spaces TV Tecnología de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN," Modelos empíricos

Modelo de propagación Cost 231, Como ya se menciona es una extensión del modelo Okumura, pero más versátil para el análisis, al igual que el anterior modelo es usado para conocer las pérdidas provenientes de redes celulares tanto en zonas urbanas, suburbanas y rurales; la fórmula matemática es [72][73]:

$$P_L(dB) = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_T) - a(h_R) + (44.9 - 6.55 \log(h_T)) \log(d) + C_M \quad (13)$$

$P_L(dB)$ = pérdidas en propagación en dB

f = frecuencia de la portadora MHz

$h_T \equiv$ altura de la antena transmisora en m

$h_R \equiv$ altura de la antena receptora en m

d = distancia entre trasmisor y receptor en Km

$a(h_R)$ = factor de corrección por la altura efectiva del receptor

C_M = factor de corrección para modelo extendido en el rango de frecuencia y

tiene un valor de 0 dB zonas rurales y suburbanas y 3 dB en ciudades

Fuente: [72] J. Pradilla, "W-Spaces TV Tecnología de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN," Modelos empíricos

b) Modelos deterministas

A diferencia de los modelos empíricos, aquí no se necesitan datos estadísticos, sino que para poder determinar las soluciones ópticas para cada problema, se basa en el comportamiento que se tiene de las señales, principios físicos de cada

uno de los valores que se pretende usar variables del problema; para ello se requiere datos concretos, verídicos para la determinación de los resultados, estos modelos usan algoritmos para su comprobación, entre los más representativos se tiene: Modelo de espacio libre y el modelo de dos rayos.

Modelo de propagación en espacio libre (Modelo de Friis), es también conocido como modelo de Friis, este tipo de modelo hace referencia en una transmisión directa, en donde no existe ninguna interferencia entre las antenas, es decir, que no existe obstáculo y existe un envío de datos en una sola trayectoria, aquí se presenta pérdidas mínimas de potencia y de amplitud de la señal, la único limitante de este modelo es la distancia que exista entre las antenas para la transmisión y la frecuencia en la cual la señal es enviada. Para calcular las pérdidas de propagación de este modelo se lo hace a través de la formula siguiente [72][73]:

$$L_f(dB) = 32.45 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (14)$$

$L_f(dB)$ = pérdidas de propagación en espacio libre dB

f = frecuencia en MHz

d = distancia entre transmisor y receptor Km

Fuente: [73] S. Caraguay, "Simulación de la red inalámbrica de banda ancha con tecnología Wimax para el Estado de Colima,"

Modelo de propagación de dos rayos (reflexión terrestre), este método es el más aplicado, ya que propone que la propagación no solo es en forma directa entre las antenas sino que siempre existe una señal reflejada, ya sea por un obstáculo o en el mismo terreno en donde se encuentra las antenas, este método es muy útil en sitios donde la distancia es amplia y el medio es irregular; al igual que el anterior su formulación matemática va hacer la siguiente [72]:

$$P_L(dB) = 40 \log(d) - (10 \log(G_T) + 10 \log(G_R) + 20 \log(h_T) + 20 \log(h_R)) \quad (15)$$

$P_L(dB)$ = pérdidas en propagación en dB

G_T = ganancia de la antena transmisora dB

G_R = ganancia de la antena receptora dB

h_T = altura de la antena transmisora m

h_R = altura de la antena receptora m

Fuente: [72] J. Pradilla, "W-Spaces TV Tecnología de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN," Modelos empíricos

c) *Modelos semi-empíricos*

En estos modelos también usan datos físicos para su comprobación, estos datos pueden ser concretos o no; pueden ser datos estadísticos, o datos obtenidos de alguna situación particular, es decir que este modelo es una combinación de los dos anteriores en donde la precisión puede variar dependiendo del problema que se requiera resolver. Estos modelos se fundamentan en la obtención de resultados más realistas al medio en el cual se pretende usar; los métodos más representativos en este modelo son: el método Walfisch-Ikegami, Walfisch-Bertoni, Longley Rise.

Modelo de propagación Walfisch-Bertoni, es un método que es usado para zonas urbanas ya que considera las edificaciones y la altura de ellas, no es un método para ser usado en zonas suburbanas y zonas rurales [72]:

Modelo de propagación Walfisch-Ikegami, en cambio este método posee una variante al método anterior ya que involucra otros factores como es la densidad de los objetos la trayectoria, y es muy usado para bandas del tipo UHF y VHF. Su función matemática es la siguiente [72].

$$P_L(dB) = 42.6 + 26 \log(d) + 20 \log(f) \text{ con líneas de vista (LOS)} \quad (16)$$

$$P_{L2}(dB) = L_o + L_{rts} + L_{msd} \text{ sin líneas de vista (NLOS)} \quad (17)$$

$$P_L(dB) = 32.4 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (18)$$

$P_L(dB)$ = pérdidas en propagación en dB

f = frecuencia de la portadora MHz

d = distancia entre transmisor y receptor en Km

L_o = pérdidas por el espacio libre

L_{rts} = pérdidas por refracción en múltiples objetos

L_{msd} = pérdidas por una única difracción

Fuente: [72] J. Pradilla, "W-Spaces TV Tecnología de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN," Modelos empíricos

Modelo de propagación Longley-Rice, es una combinación de varios métodos para calcular las pérdidas producidas por la propagación, por lo que es un método complejo de usar, para este método involucra factores como la distancia entre las antenas, pérdidas por difracción, características de refracción, este método es usado para las bandas de frecuencias UHF y VHF en diferentes tipos de zonas.

Utiliza los modelos como modelo de dos rayos, modelo Knife Edge, y el modelo de Van de Pol-Bremmer [72].

Modelo de propagación SU1, es un modelo desarrollado por un grupo de trabajo de la IEEE, este modelo es más utilizado en zonas rurales su fórmula matemática es la siguiente:

$$P_L(dB) = A + 10 \log \left(\frac{d}{d_o} \right)^2 + X_f + X_h + S \text{ para } d > d_o \quad (19)$$

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_o}{\lambda} \right)^2 \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (21)$$

$P_L(dB)$ = pérdidas en propagación en dB

A = parámetro de corrección

y = ruta de pérdida

d = distancia entre transmisor y receptor en Km

d_o = distancia de referencia entre 100 y 1000 m

X_f = factor de corrección para frecuencias mayores a 2 GHz en MHz

X_h = factor de corrección para altura de la antena receptora en m

S = factor de corrección de sombras dB

c = velocidad de la luz 3×10^8 m/s

Fuente: [73] S. Caraguay, "Simulación de la red inalámbrica de banda ancha con tecnología Wimax para el Estado de Colima,"

2.4 Enlace para envío de información desde medidores inteligentes

Para poder enviar la información de los medidores inteligentes se requiere de un tipo de comunicación que sea flexible y que se pueda usar en el medio que se requiera; cada uno de los tipos de comunicaciones inalámbricas que se mencionó en la sección 2.1 se puede usar para brindar este servicio, pero uno de los factores que intervienen es que muchas de las tecnologías requieren de una inversión en infraestructura, por tal motivo se pretende usar la TV White Space como medio de enlace de la información, se eligió este tipo de tecnología ya que es para brindar en zonas rurales, a continuación se detallara el principio de funcionamiento de esta tecnología.

a) TV White Space

La tecnología TV White Space posee una cobertura y gran alcance para brindar

servicio a zonas alejadas del sector urbano, su cobertura esta entre los 30 a 100 Km dependiendo de la potencia a transmitirse, a esta tecnología se la puede dividir en tres grupos que se mencionan a continuación.

UHF, son espectros de frecuencia ultra alta, proviene de las siglas ultra high frequency, la frecuencia a la que normalmente opera está en el rango de 300 MHz a 3 GHz, por tener frecuencias tan altas puede transmitir gran cantidad de datos sin ningún problema, pero su mayor desventaja por el mismo hecho de poseer un alto rango de frecuencia es la distancia de envío, la cobertura del mismo ya que disminuye notablemente; normalmente la velocidad de transmisión puede variar entre 30 Kbps, 486 Kbps y hasta 1 Mbps, todo depende de las aplicaciones que se quieran realizar [51][75].

VHF, son espectros de frecuencia muy alta, proviene de las siglas very high frequency, el rango de las frecuencias que utiliza están alrededor de los 30 a los 300 MHz, la gran diferencia que tiene este tipo de frecuencias es que no se ven afectados por cambios ambientales ni a ondas electromagnéticas como las HF, pero su rango de operación o cobertura es limitada; las velocidades de transmisión en uplink y downlink son de 9600 y 4800 Kbps, respectivamente. La seguridad es uno de los puntos fuertes que posee VHF, ya que para la transmisión de los paquetes de datos primero realiza una encriptación de la información, filtra, realiza una codificación tanto A/D como D/A, con la finalidad de conservar la información, enviarla de forma más rápida y sin saturar los canales de la frecuencia [51].

Tanto UHF como VHF, pueden ser utilizadas para realizar conexiones del tipo AD-DOC Networking o Mesh Networking permitiendo el envío de la información a una distancia de 1 Km [51].

HF, son espectros de frecuencia alta, proviene de las siglas high frequency, la frecuencia a la que operan esta entre los 3 a 30 MHz, sus aplicaciones principales es en comunicaciones de radio; son frecuencias muy sensibles a diferentes cambios de la naturaleza, como variaciones solares, variaciones climáticas, dependen de la distancia entre antenas para la transmisión, una de las causas más notables de perdida es por alteraciones electromagnéticas, ya que las ondas electromagnéticas alteran a las ondas produciendo pérdidas de información. La

tecnología HF tiene la capacidad de designar de forma automática los canales a cada uno de los usuarios, esto se realiza desde las estaciones base; para ello se basan en la normativa MIL-STD-188-141 [51].

Para la utilización de esta tecnología, es de suma importancia el empleo del censado del espectro, detección de energía o también conocido como “Spectrum sensing” este censado de la energía es de suma importancia cuando se requiere conocer los huecos espectrales que no usa la televisión; con esto ayuda a no saturar las comunicaciones a los operadores primarios [68]:

Un sistema TV White Space debe poseer las siguientes partes. Una buena capacidad, lo que implica que no exista ruido ni saturación de los canales; para ello cada canal posee 6 MHz, optando por velocidades de 1.5 Mbps de bajada, y 384 Kbps de subida. Para la transmisión se usa la capa física, en donde se la divide en dos partes; la MAC y la MPD que es la encargada de interaccionar con las conexiones inalámbricas. Para usar la TV White Space o Wran, se usa la modulación OFDMA, esta modulación consigue que varios usuarios puedan compartir el espectro asignado y así enviar la información multiplexada; Otra característica de esta tecnología es los tiempos de propagación de las señales, está en un rango de 25 a 50 micros segundos. OFDMA utiliza las siguientes modulaciones, QPSK, 16QAM, y 64 QAM, este tipo de modulación realiza transferencias de pocos datos, la gran ventaja es que son modulaciones digitales [68][76][77].

Para la detección de los canales que se encuentran ocupados por operadores primarios, se realiza unos manejos del espectro por medidas de banda, estas medidas de banda existen de dos tipos, medidas en banda y medidas fuera de banda; estas dos medidas realiza un análisis de cada uno de los canales para verificar que canales se encuentra ocupados y los que no son reutilizados; para ello se utiliza el censado del espectro, este censado analiza el espectro con la finalidad de localizar las bandas que se encuentran ocupadas; existen dos métodos de censado, un censado rápido o fast sensing, y un censado preciso. El fast sensing por medio de algoritmos matemáticos analiza los operadores primarios y la ocupación de los canales este análisis es rápido y eficiente, aparte

de ello verifica si es necesario el uso del censado preciso; cuando el primer censado determina que es necesario un censado más preciso, este lo que realiza es un análisis más detallado de cada uno de los canales, este análisis puede durar milisegundo por cada uno de los canales este mecanismo de censado es el más eficiente para conocer la ocupación de los canales [68]. Como ya se ha mencionado si se desea usar esta tecnología es indispensable que exista un censado del espectro, y quien se encarga de monitorear, censar el espectro es el C-MVNO, ya que este operador solo se encarga de verificar los espacios que deja la televisión, es decir los espacios en del espectro que no son utilizados, y así arrendar este espectro con la finalidad de minimizar las operaciones y el uso de los canales [75][78].

una de las ventajas del uso de esta tecnología son los rangos de cobertura que posee, la gran penetración que existe en el medio de propagación que se encuentre; para medición inteligente se emplea la tecnología UHF por motivos que la tecnología a utilizar no es muy costosa y es un estándar abierto [79].

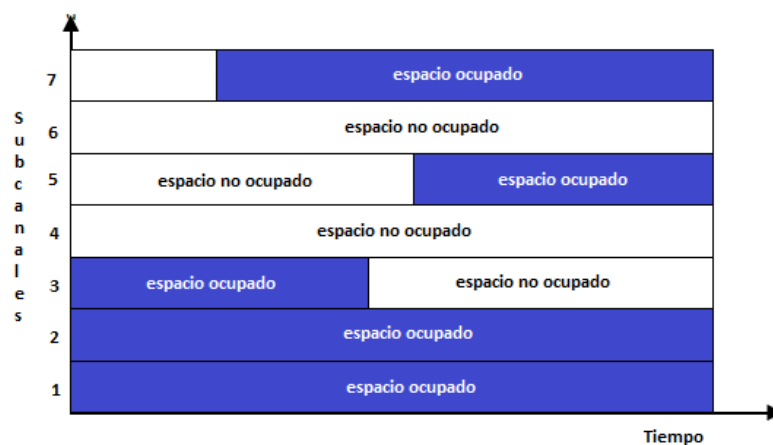


Figura 2.4. Ocupación de los canales de TV

Fuente: [68] A. Vega, "Evaluación del Espectro radioeléctrico VHF/ UHF en parroquias urbanas y rurales del cantón Loja para el despliegue de sistemas de radio cognitiva,"

CAPÍTULO III

III. MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS PARA ZONAS RURALES

En este capítulo se presenta las variables que se requieren para simular y modelar las condiciones adecuadas para tener una mejor visión y la factibilidad de implementar un servicio como es el de medición inteligente; por lo tanto es importante conocer el servicio que se encuentra dando en la actualidad, como es el caso del tráfico, cobertura del espectro de televisión. Para la modelación y simulación se utilizara los algoritmos mencionados a continuación y se presentarán las gráficas pertinentes en cada uno de los modelos planteados, estos modelos serán analizados en la sección 3.3 y la simulación se presentara en la sección 3.4.

3.1 Zonificación de áreas AMI según el índice de pérdidas no técnicas

De lo expuesto en el capítulo 1, sobre las perdidas en el Ecuador, tener una zonificación exacta sobre qué zonas poseen un mayor índice de pérdidas en estos momentos es muy complejo por lo ya expuesto en el mismo capítulo; se puede realizar una zonificación de las áreas de forma generalizada ya que se conoce que las empresas de distribución con mayor índice de pérdidas totales, son las siguientes:

CNEL Los Ríos con un porcentaje de pérdidas del 27.06 %

CNEL Manabí con un porcentaje de pérdidas del 24.45 %

CNEL Esmeraldas con un porcentaje de pérdidas del 22.03 %

Con estos datos se puede conocer que sitios se requiere mejorar la eficiencia del sistema de distribución con la finalidad de mejorar la confiabilidad del sistema. Para realizar una zonificación se debe tener los parámetros exactos de las pérdidas no técnicas.

Para ello se ha optado por la realización de la zonificación en la Provincia de Pichincha, como se conoce se tiene una cobertura buena; en la provincia de pichincha posee la suficiente infraestructura como para albergar este servicio; también se conoce que el tráfico en el espectro de UHF y VHF, no sobrepasa del

50%, esto está mejor detallado en la sección 3.2 de este capítulo.

3.2 Tráfico, cobertura y calidad de servicio en redes inalámbricas

Para el uso de una tecnología como es el caso de WRAN o también conocido como TV White Space en el Ecuador para brindar el servicio de medición inteligente, se requiere conocer las condiciones en las cuales opera TV White Space; por ese motivo es de suma importancia establecer los parámetros de operación en el Ecuador; por lo dicho se establece el estado actual de las frecuencias UHF y VHF, con la finalidad de conocer su tráfico, su cobertura y su calidad del servicio. Esto nos dará una mejor visión si es posible implementar medición inteligente reutilizando los sub-canales libres que deja esta tecnología.

a) Tráfico de TV White Space.

Para analizar el tráfico de WRAN se opta por conocer el porcentaje de ocupación que existe entre las bandas de frecuencia de 54 MHz a 900 MHz. Para determinar la cobertura tanto de VHF y UHF, es necesario conocer los rangos de utilización del espectro en cada una de las provincias, esto nos facilita comprender si existen rangos de frecuencia no utilizados. El nivel de ocupación de las dos bandas de frecuencia se los determina por medio de los valores suministrados de la empresa SENATEL (Secretaría Nacional de Telecomunicaciones).

Provincias	Ocupación del espectro	Provincias	Ocupación del espectro
Azuay	51%	Los Ríos	26%
Bolívar	32%	Manabí	37%
Cañar	32%	Morona Santiago	28%
Carchi	29%	Napo	42%
Chimborazo	29%	Orellana	29%
Cotopaxi	20%	Pastaza	14%
El Oro	11%	Pichincha	47%
Esmeraldas	17%	Santa Elena	14%
Galápagos	28%	Santo Domingo	17%
Guayas	70%	Sucumbíos	29%
Imbabura	29%	Tungurahua	19%
Loja	29%	Zamora Chinchipe	28%

Tabla 3.1. Ocupación del espectro UHF de mayor ocupación del espectro 2013-2014
Fuente: [80] SENATEL, "Ocupación del espectro UHF por provincias," Pichincha, 2014.

En cada una de las provincias presentadas el porcentaje de ocupación no sobrepasa del 50% para una frecuencias UHF, con lo que el resto del 50% es una frecuencias libre que no es utilizada; cabe resaltar que la tabla 3.1 solo representa la banda de frecuencia en el rango de 440 a 512 MHz, del resto de la banda no presenta un porcentaje de ocupación de la frecuencia en UHF, para conocer la ocupación del espectro se realizó una gráfica que nos da tanto la ocupación en porcentaje como en MHz.

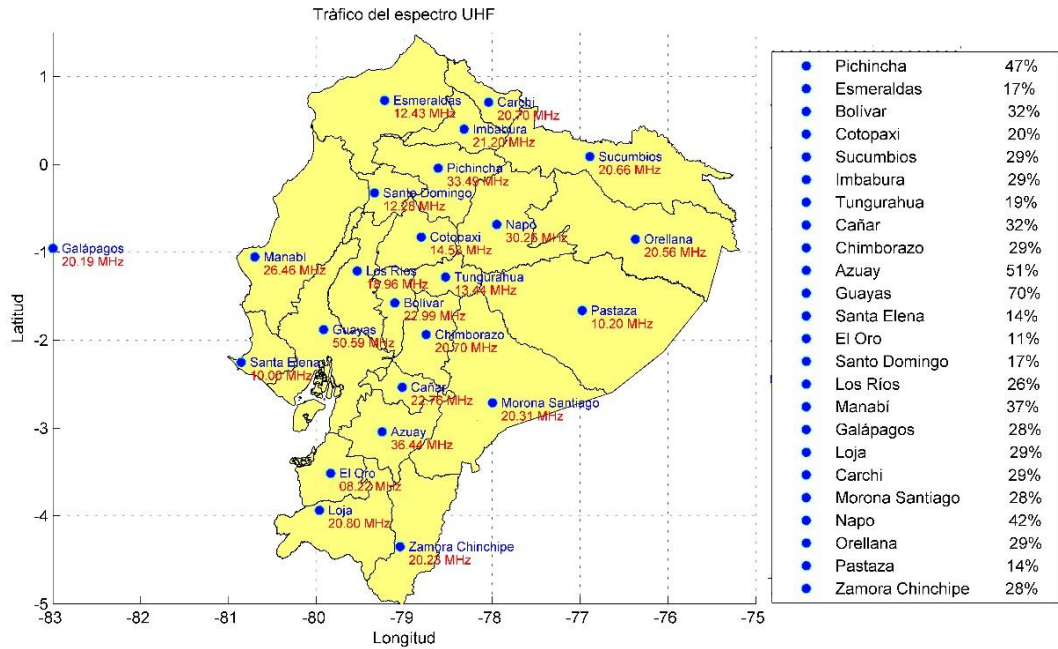


Figura 3.1. Ocupación del espectro UHF en el Ecuador

En cambio para conocer el rango de frecuencia para VHF se presenta la siguiente tabla ilustrativa, al igual que la anterior tabla solo representa el porcentaje.

Provincias	Ocupación del espectro	Provincias	Ocupación del espectro
Azuay	18.20%	Los Ríos	19.60%
Bolívar	6.10%	Manabí	11.60%
Cañar	9.20%	Morona Santiago	4.30%
Carchi	4.40%	Napo	11.60%
Chimborazo	5.70%	Orellana	20.70%
Cotopaxi	13.40%	Pastaza	4.80%

El Oro	11.00%		Pichincha	28.50%
Esmeraldas	12.10%		Santa Elena	14.80%
Galápagos	0.90%		Santo Domingo	6.80%
Guayas	23.00%		Sucumbíos	22.10%
Provincias	Ocupación del espectro		Provincias	Ocupación del espectro
Imbabura	9.50%		Tungurahua	13.80%
Loja	7.20%		Zamora Chinchipe	3.10%

Tabla 3.2 Ocupación del espectro en VHF.

Fuente: [81] SENATEL, "Ocupación del espectro VHF por provincias," Pichincha, 2014.

La tabla 3.2 muestra la ocupación del espectro VHF, podemos determinar que su ocupación es mínima menor al 25% de ocupación; lo que cabe destacar que la tabla ilustra para el rango de frecuencia de 138 a 174 MHz. De forma concreta se presenta una ilustración con la ocupación del espectro tanto en MHz como en porcentaje.

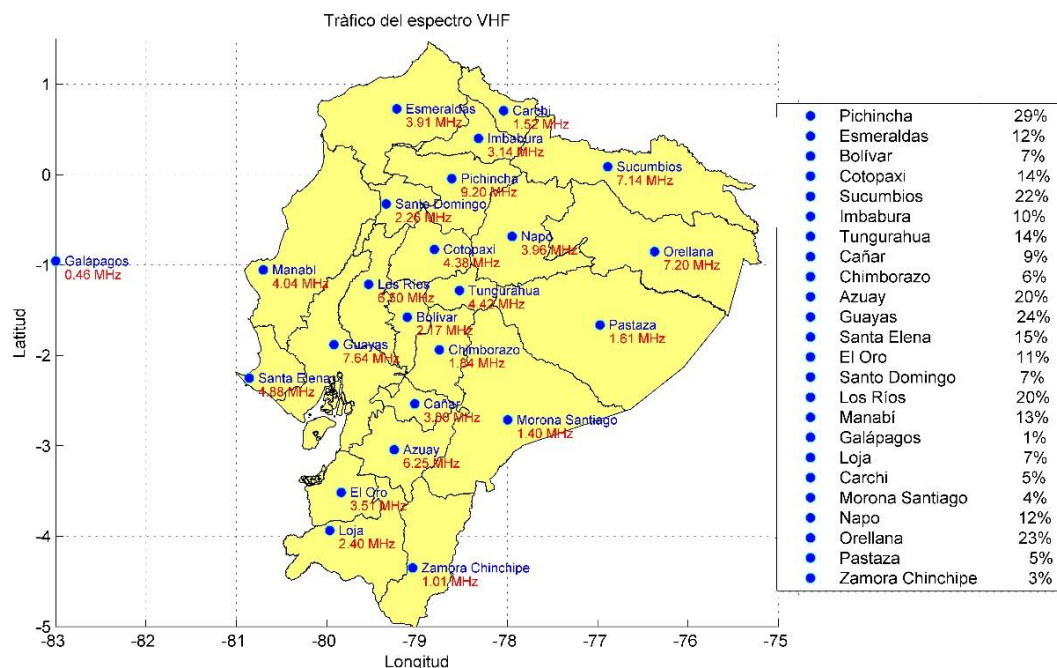


Figura 3.2. Ocupación del espectro VHF en el Ecuador

Con estas dos tablas y las ilustraciones podemos determinar que el tráfico en las diferentes provincias es mínima y se puede reutilizar para la implementación de medición inteligente; también en el Ecuador todavía se usa las frecuencias

establecidas de forma análoga- digital, es decir que en el Ecuador se encuentra en un cambio de tecnología analógica a digital; por medio de la resolución aprobada en marzo del 2010 donde se presenta una regulación para adoptar un estándar de televisión digital, con la finalidad de implementar tanto para la transmisión y recepción de la señal de forma digital [82][83].

b) Cobertura para TV White Space

Para analizar la cobertura que existe en la tecnología TV White Space, se requiere de conocer cómo se encuentra la infraestructura, si existe la disponibilidad de equipos suficientes para albergar un servicio más, si el rango de cobertura de la tecnología es la adecuada para la implementación de medición inteligente en zonas rurales. De lo anterior expuesto existe sobre el tráfico se evidencio que si existe una infraestructura para UHF y VHF, ahora lo que se desea conocer en que sitios existe mayor capacidad; la finalidad de conocer la cobertura de esta tecnología es para minimizar las inversiones en infraestructura, y saber si existe la posibilidad de que la inversión sea mínima en implementación de nuevas radio bases para brindar los servicios pertinentes. Pero también como se evidencio por medio de las regulaciones en la actualidad existe una inversión para cambiar de tecnología.

Para conocer la cobertura de las dos tecnologías se presentan datos expuestos por SENATEL; los datos presentados por el SENATEL se los categoriza en 3 partes fundamentales:

- Las estructuras necesarias para brindar el servicio de televisión, tanto para UHF como para VHF.
- Las antenas repetidoras que se encuentran en pleno funcionamiento tanto para UHF como para VHF
- Y las estaciones de televisión por provincias, en estas se las categoriza en estaciones públicas como en estaciones privadas.

Todo esto podemos resumir un el número de estaciones que se posee por provincia, el número de repetidoras que existen por provincias, esto se lo debe de categorizar por el tipo de frecuencias, es decir si es UHF o VHF; a continuación se demuestra una tabla con la información necesaria.

Provincia	UHF	VHF	Matriz	Repetidora	Total
AZUAY	9	22	2	29	31
BOLIVAR	3	9	1	11	12
CAÑAR	9	8	2	15	17
CARCHI	13	11	1	23	24
CHIMBORAZO	10	18	2	26	28
COTOPAXI	6	7	4	9	13
EL ORO	10	9	2	17	19
ESMERALDAS	12	17	5	24	29
GALAPAGOS	12	15	3	24	27
GUAYAS	16	12	17	11	28
IMBABURA	9	12	5	16	21
LOJA	8	19	3	24	27
LOS RIOS	11	13	3	21	24
MANABI	15	20	4	31	35
MORONA SANTIAGO	4	19	1	22	23
NAPO	6	12	1	17	18
ORELLANA	2	3	0	5	5
PASTAZA	4	8	1	11	12
PICHINCHA	17	14	15	16	31
SANTA ELENA	11	9	2	18	20
SANTO DOMINGO	8	7	4	11	15
SUCUMBIOS	3	14	2	15	17
TUNGURAHUA	11	11	2	20	22
ZAMORA CHINCHIPE	4	18	1	21	22

Tabla 3.3. Estaciones base, y repetidoras por cada rango de frecuencia
Fuente: [84] SENATEL, "Número de estaciones base y Repetidoras de televisión," Pichincha, 2014.

Para comprender de mejor manera la tabla se ilustra a continuación la cobertura por provincias, esto ayuda a tener un mejor análisis de la cobertura del espectro y así tener una mejor visualización de cada uno de los aspectos que se muestran en la tabla que se adjunto anteriormente.

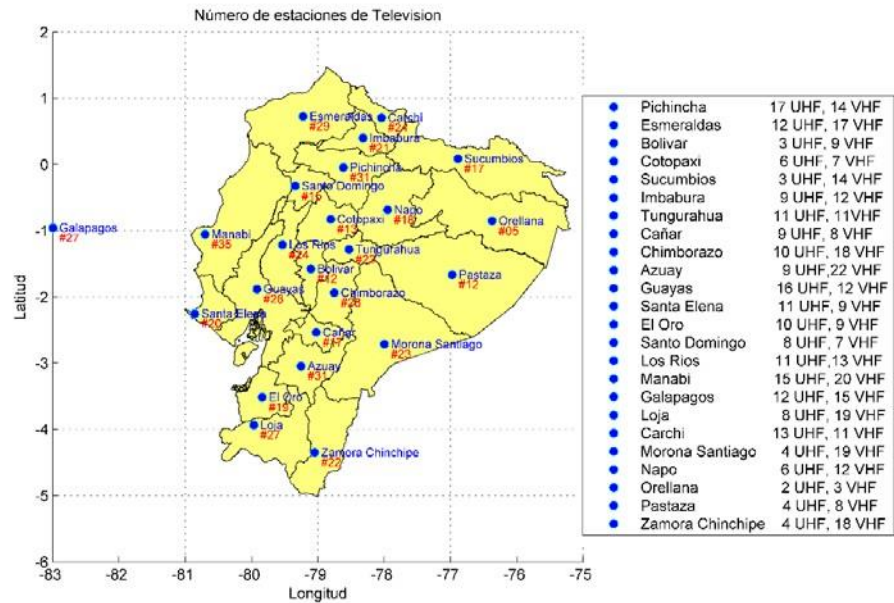


Figura 3.3. Cobertura del espectro tanto en UHF como en VHF

c) *Calidad de servicio para TV White Space*

La calidad de servicio es uno de los parámetros importantes, cuando se requiere conocer cómo se encuentra una el uso de la tecnología, y más aún si se desea reutilizarla para implementar un nuevo servicio; para conocer mejor de este tema se es indispensable basarse en los reportes presentados por la institución encargada del espectro radioeléctrico, pero desde el punto de vista del servicio de televisión. Por ese motivo, SENATEL en el Plan nacional de Frecuencias varios puntos estratégicos para brindar un servicio de calidad, confiable.

- Los medios de comunicación deben de modernizarse para brindar un servicio óptimo [85].
- Se realiza un marco regulatorio en base a los avances tecnológicos de la información y de la comunicación [85].
- Por medio del Plan Nacional de frecuencias se establece la distribución de del espectro radioeléctrico y los mecanismos para implementar nuevos servicios.
- Para brindar un servicio adecuado los medios de comunicación se fundamentan en la normativa (ITU) Unión Internacional de Telecomunicaciones [85].

Todos estos puntos hacen referencia a como se debe de manejar y como se debe de brindar el servicio de comunicaciones en el país, a que normativa se deben de seguir para un buen funcionamiento del servicio brindado.

Aparte de lo expuesto en el Ecuador se encuentra en transición por el cambio de tecnología, de una tecnología análoga a digital, esto también influye en la calidad del servicio, se está mejorando el medio de comunicación, para brindar una mejor estabilidad y un mejoramiento de la transmisión y recepción de los canales de televisión; esto es un aporte que se empezó en el 2010.

3.3 Modelo de análisis del comportamiento de redes inalámbricas en zonas rurales

Para tener un análisis concreto del comportamiento de los servicios que se pueden incorporar en la red celular se utiliza dos formas de análisis, cada uno de estos análisis de los diferentes modelos ayudan a comprender de mejor manera el comportamiento de una red celular y la factibilidad de incorporar un AMI como servicio eléctrico; el primer análisis es la verificar del envío de información, un ruteo optimo por los algoritmos de Dijkstra y Kmeans; la segunda metodología es realizando una asignación de los recursos de los canales para WRAN con tecnología TV White Space, por medio del algoritmo de Greedy.

a) Modelamiento de la red con los algoritmos de Dijkstra y Kmeans para un ruteo optimo

El modelamiento de estos algoritmos son muy usados cuando se desea encontrar la mejor ubicación de los centros de aglutinamiento y de optimizar el envío de información; En conjunto el algoritmo de Dijkstra y Kmeans son óptimos para realizar este trabajo; cada algoritmo cumple una función, y se complementan mutuamente con la finalidad de optimizar el proceso, por este motivo de conocerá la función primordial de cada algoritmo a continuación.

El algoritmo de Kmeans, es uno de los más usados para la conglomeración de las de los diferentes puntos coordinados; estos puntos coordinados se agrupan en un centro base que es el encargado de enlazarse a los puntos coordinados agrupados y los otros centros base. Este algoritmo es una herramienta importante para el análisis de datos ya que no solo agrupa los puntos coordinados sino que tiene la capacidad de crear los centros base óptimos para el enrutamiento. Para el

uso óptimo de este algoritmo es fundamental conocer las coordenadas de los puntos y el número de conglomerados que se piensan ubicar [86].

Algoritmo de Dijkstra, es uno de los métodos más usados para conocer la conexión óptima entre los diferentes puntos coordinados; por esta razón es importante conocer las distancias que existan entre los diferentes centros base y los puntos; a estas distancias se le puede asumir un peso para un mejor análisis de datos; pero el peso debe ser un número mayor a cero. El algoritmo de dijkstra utiliza un lazo cerrado para determinar el camino más factible de conexión; va analizando las distancias suministradas al algoritmo por medio de un proceso iterativo, en cada iteración selecciona una distancia, esta distancia debe de ser la factible de enlazamiento; cuando termina la iteración se conoce la conexión óptima para la comunicación entre las diferentes coordenadas establecidas [87].

- Modelo de análisis optimo sin la influencia de pesos en las líneas de comunicación.

Cada uno de los algoritmos cumple una función vital para el análisis de enrutamiento óptimo. El modelo que forman estos dos algoritmos es descrito a continuación.

Para el funcionamiento adecuado del método de análisis se debe de establecer los diferentes datos o variables que van hacer introducidos en los algoritmos estos datos son:

Primero se debe de ingresar los datos como número de empresas de distribución (Nusr), máxima y mínima cantidad de usuarios por clúster (MaxUsr, MinUsr), distancia máxima permitida para la conexión optima (dmax), número de estaciones base a las que se van a enlazar las empresas (K), desde que sitio se pretende enviar la información (origen), el sitio al cual va allegar esta información (destino), importación de las coordenadas geográficas de las diferentes empresas de distribución (longitud, latitud), la asignación de un peso para las coordenadas (dpeso). Estos van hacer los datos de iniciación.

Se ubica en el mapa del Ecuador las empresas de distribución (EC) con los datos importados, realización de las conexiones de las empresas con las estaciones base (BS), es decir esta representación viene hacer el estado actual de

la interconexión entre las diferentes empresas de distribución (EC).

Utilizamos el algoritmo de Kmeans para agrupar las EC a cada uno de los BS, se realiza una comparación con las diferentes restricciones; se ubica las estaciones bases y las empresas de distribución en el mapa, los datos que requiere el algoritmo para su funcionamiento son “K” y las coordenadas geográficas (CG) de la empresas de distribución “longitud y latitud”. Las restricciones citadas son las siguientes:

$$Nurs > MaxUsr \quad (22)$$

$$Nurs_{min} \leq (MinUsr - 1) \quad (23)$$

En donde se compara el número de usuarios con la cantidad máxima de usuarios por clúster. El modelo del algoritmo de Kmeans es el siguiente:

$$[idx, ctrs] = kmeans(X, K); \quad (24)$$

De donde: “idx” es el enlace de las BS a cada CG; “ctrs” viene a ser los BS óptimos que determina Kmeans. El “X” y “K” es las variables de entrada del algoritmo y en cambio “idx” y “ctrs” son mis salidas.

Calcula la distancia entre cada uno de las coordenadas geográficas de las EC y de los BS, compara las distancias con la distancia máxima entre conexión, y realiza las restricciones pertinentes para optimizar aún más el modelo matemático. Las restricciones mencionadas son:

$$dist(i, i) = inf; \quad (25)$$

Lo que realiza esta restricción es colocar la diagonal principal de la matriz igual a infinito, con la finalidad de no obtener la ruta optima en una misma CG.

$$dist(dist > dmax) = inf; \quad (26)$$

Esta restricción modifica las distancias mayores a la distancia permitida de enlace.

$$dist(1: end, ml + 1: end) = inf; \quad (27)$$

Estas tres restricciones pertenecen a las coordenadas geográficas de las EC. De donde “dist” hace referencia a la distancia entre las EC.

$$distp(i, i) = inf; \quad (28)$$

$$distp(distp > dmax) = inf; \quad (29)$$

$$\mathbf{distp}(1: \mathbf{end}, \mathbf{ml} + 1: \mathbf{end}) = \mathbf{inf}; \quad (30)$$

En cambio las restricciones citadas anteriormente representan las coordenadas geográficas de las BS; de donde *distp* son las distancias entre las BS.

Obtenido las distancias se procede a la utilización del algoritmo de dijkstra para encontrar una la ruta óptima para el envío de los datos, partiendo de uno de los sitios candidatos, y llegando a otro de los sitios candidatos; es decir una de las EC.

$$[\mathbf{pathp}] = \mathbf{dijkstramod}(\mathbf{ml}, \mathbf{distp}, \mathbf{origen}, \mathbf{destino}, 1: \mathbf{ml}, 1: \mathbf{ml}); \quad (31)$$

De donde *dijkstramod* representa el llamado de la función que contiene el algoritmo de dijkstra; *ml* representa el número de BS que nos da el algoritmo de Kmeans.

Por último el modelo de la red devuelve varias ilustraciones del comportamiento óptimo que se obtuvo tras la aplicación de los diferentes algoritmos utilizados.

- Modelo de análisis optimo con influencia de pesos en las líneas de comunicación.

El análisis mostrado anteriormente es factible si no existiera algún tipo de impedimento para el envío de la información, como por ejemplo la saturación, congestión de alguna línea de comunicación; es decir que toda la red en este caso de fibra óptica estaría 100% disponible para nuestro propósito. Pero como esta red alberga otros servicios va haber una congestión de las redes y eso impide una buena comunicación entre las BS. Por esta razón es importante asignarle un peso que representara la disponibilidad de las líneas, la saturación o tráfico que puedan tener. Para su funcionamiento se utiliza las mismas restricciones citadas anteriormente; el proceso de evaluación para el óptimo funcionamiento del modelo es el mismo, se utiliza los mismos algoritmos para el análisis, la gran diferencia es la incorporación de unas restricciones para el dpeso (peso incorporado para conocer la saturación de las líneas de fibra óptica). Este peso modificara la matriz de distancias óptimas calculadas con la finalidad de utilizar solo las distancias modificadas por el dpeso al algoritmo de dijkstra, para que realice el proceso ya mencionado anteriormente. Las restricciones utilizadas para la variable dpeso son las siguientes:

$$\mathbf{distp}(i, i) = \mathbf{inf}; \quad (32)$$

El concepto de la restricción es el mismo que el anterior. Primero hace infinita la diagonal principal

$$\mathbf{distp} = (\mathbf{distp}/\mathbf{dmax}) > \mathbf{dpeso}; \quad (33)$$

Evalúa la distancia que no sea mayor que el peso establecido, con la finalidad de eliminar las rutas saturadas;

$$\mathbf{distp}((\mathbf{distp} * \mathbf{dmax}) > \mathbf{dmax}) = \mathbf{inf}; \quad (34)$$

$$\mathbf{distp}(1: \mathbf{end}, \mathbf{ml} + 1: \mathbf{end}) = \mathbf{inf}; \quad (35)$$

Vuelve a evaluar la distancia mayor a la distancia permitida, la gran diferencia es la incorporación del dpeso en las restricciones mencionadas.

Posteriormente se hace el ingreso de la distancia modificada en el algoritmo de dijkstra. Tal como se muestra en la siguiente función.

$$[\mathbf{pathp}] = \mathbf{dijkstramod}(\mathbf{ml}, \mathbf{distp}, \mathbf{origen}, \mathbf{destino}, 1: \mathbf{ml}, 1: \mathbf{ml}); \quad (36)$$

Por último el modelo de análisis modificado de la red devuelve varias ilustraciones del comportamiento óptimo que se obtuvo tras la aplicación de los diferentes algoritmos utilizados con la incorporación del tráfico que puede tener las redes de comunicación por los servicios que puede estar prestando.

- Análisis del modelo optimo, optando que no existe restricción en la red de comunicación.

Cada uno de los algoritmos pueden ser utilizados para modelar varias situaciones, como se puede evidenciar en estos análisis; pero para en este caso se opta por realizar un modelamiento de una red ideal; es decir que el envío de la información es ideal no existe restricción alguna en cuanto a tráfico; es síntesis se afirma que la comunicación posee una topología mallada; es decir que la ruta de optima de envío puede ser cualquier coordenada geográfica “CG” o empresa de distribución eléctrica “EC”. Para el funcionamiento de este modelo se establece el siguiente principio de funcionamiento:

Los datos a ingresar son; “Nusr”, “MaxUsr”, “MinUsr”, “dmax”, “K”, “origen”, “destino”, “longitud”, “latitud”. Datos para el modelo matemático.

Se ubica en el mapa del Ecuador las “EC”, se realiza las conexiones de las “EC”

con “BS”, es decir es el estado actual de la interconexión entre las “EC”.

Utilizamos el algoritmo de Kmeans para agrupar las EC a cada uno de los BS, Las restricciones citadas son las siguientes:

$$Nurs > MaxUsr \quad (37)$$

$$Nurs_{min} \leq (MinUsr - 1) \quad (38)$$

$$[idx, ctrs] = kmeans(X, K); \quad (39)$$

De donde: “idx” es el enlace de las BS a cada CG; “ctrs” viene a ser los BS óptimos que determina Kmeans.

Calcula la distancia entre cada uno de las coordenadas geográficas de las EC. Las restricciones mencionadas son:

$$dist(i, i) = inf; \quad (40)$$

$$dist(dist > dmax) = inf; \quad (41)$$

$$dist(1:end, ml + 1:end) = inf; \quad (42)$$

Estas tres restricciones pertenecen a las coordenadas geográficas de las EC. De donde dist hace referencia a la distancia entre las EC.

Se utiliza el algoritmo de dijkstra para encontrar una la ruta óptima.

$$[pathp] = dijkstramod(ml, distp, origen, destino, 1:ml, 1:ml); \quad (43)$$

De donde dijkstramod representa el llamado de la función que contiene el algoritmo de dijkstra; ml representa el número de BS que nos da el algoritmo de Kmeans.

Por último el modelo de la red devuelve varias ilustraciones del comportamiento óptimo que se obtuvo tras la aplicación de los diferentes algoritmos utilizados.

Cada uno de los algoritmos pueden ser utilizados para modelar varias situaciones, como se puede evidenciar en estos análisis; pero para en este caso se opta por realizar un modelamiento de una red ideal; es decir que el envío de la información es ideal no existe restricción alguna en cuando a tráfico; es síntesis se afirma que la comunicación posee una topología mallada; es decir que la ruta de optima de envío puede ser cualquier coordenada geográfica “CG” o empresa de distribución eléctrica “EC”. Para el funcionamiento de este modelo se establece el siguiente principio de funcionamiento.

b) Modelamiento de la red con el algoritmo de Dijkstra y flujo de tráfico con el programa Lp solve

Como ya se determinó en la sección anterior, el algoritmo de Dijkstra es muy usado para encontrar la ruta óptima por medio de la distancia de conexión entre las estaciones base o entre los medidores de energía eléctrica; para la siguiente modelación se realiza un flujo de tráfico con la finalidad de determinar una ruta optima de acuerdo a la capacidad del enlace y el nivel de saturación que se encuentre en un instante determinado.

Flujo de tráfico, nos ayuda a determinar la congestión que se genera por el envío de la información por una ruta en la cual existe una saturación por el uso excesivo de la misma vía de comunicación; este flujo de tráfico se pretende determinar cuál es la capacidad de saturación de una red y cuál será la ruta favorable de envío, esta ruta puede ser la misma ruta optima de mínimas distancias u otra ruta que pueda ser la ruta menos factible pero si la única disponible; es síntesis el flujo de tráfico nos sintetiza las operaciones de conocer un enrutamiento optimo pero tomando en cuenta el trafico producido por el uso de las redes de comunicación [88].

El programa mencionado lp-solve es una herramienta muy útil que nos ayuda a la optimización de forma más rápida; este programa calcula las restricciones necesarias con la finalidad de encontrar el mejor resultado para la función objetiva planteada; este programa posee unas herramientas tanto para realizar minimización como maximización de los recursos ingresados para la realización de la optimización. Y el algoritmo de dijkstra ya se mencionó en la anterior sección cual es principal funcionamiento y la principal función objetivo que posee; por lo tanto a continuación se realiza el modelamiento del algoritmo planteado, por lo tanto debe de seguir la siguiente proceso.

Antes del ingreso de las variables se realiza el llamado del programa Lp-solve, cada uno de ellos se encargan de las restricciones, y de las posibles conexiones que pueden existir en los diferentes nodos. Para ello se hace el llamado de los siguientes programas. El “mst.lp” que se encarga de las restricciones, mientras que el “routing_cap_lp” se encarga de las posibles conexiones entre los nodos existentes.

$$fopen('mst.lp', 'w') \quad (44)$$

$$fopen('routing_cap.lp', 'w') \quad (45)$$

Ingreso de las variables necesarias para la ejecución del programa, cada una de ellas son necesarias para el análisis como por ejemplo; “N”, el número de estaciones; “dmin” distancia mínima de conexión; “x” y la variable “y” que son los puntos aleatorios que encuentra el programa como conexiones óptimas. “dist”, la distancia de conexión entre los SB; también se determina el ancho de cada una de las conexiones factibles “cap”. Se calcula el tráfico de cada una de las conexiones “traf” y la disponibilidad de cada una de las conexiones “disponible” como también el porcentaje de ocupación de las mismas conexiones “ocupado”; cada uno de los valores para las gráficas es de forma randomica, es decir que lo ejes de las variables no son predeterminados.

Se empieza a evaluar las restricciones que se crearon tras la ejecución del programa “mst.lp”, las restricciones que se emitieron por el programa pueden ser las siguientes:

- Restricción en la conexión de los enlaces activos
- Restricción en el número de enlaces existentes
- Optimización del programa tras evaluar las restricciones.

Estos parámetros son importantes para calcular las conexiones factibles entre los diferentes “SB”, estas conexiones serán evaluadas por las restricciones y por la “dmin” establecida como una variable de entrada.

$$dist < dmin \quad (46)$$

Una vez ya ejecutado el programa “mst.lp”, evaluada las restricciones y encontrado el enlace factible, se utiliza el algoritmo de Dijkstra para encontrar la ruta optima de las “BS”, para efectuar el algoritmo se utiliza los siguientes valores de entrada, de donde el “orig” es el punto de inicio de la conexión y el “dest” es el punto final de la conexión.

$$dijkstramod(N, dist, orig, dest, 1: N, 1: N) \quad (47)$$

Para la realización del análisis de tráfico, se utiliza el nivel de disponibilidad que posee las conexiones “disponible”, esta disponibilidad me proporciona la

capacidad de la red no es utilizada todavía, y por donde todavía puedo enviar la información. Para que funcione se utilizaron las siguientes restricciones de conexión. De donde “enviosdatos” nos ayuda a determinar el valor de lo que se pretende enviar y comprobar si existe la capacidad disponible para el envío por esa conexión.

$$disponible - enviosdatos < enviosdatos \quad (48)$$

Una vez realizado la optimización de la ruta factible por medio de la matriz de disponibilidad por medio de un flujo de tráfico se efectúa el siguiente análisis.

El segundo análisis efectuado se realiza dos diagramas de operación, en donde se determina los datos que envías y recibes en las conexiones factibles, entre las “SB”. En donde se puede apreciar la capacidad de enlace de cada una de las “SB” y también la tendencia del envío y recepción de la información. Para calcular la tendencia de cada uno de los nodos se aplicó la siguiente formula:

$$PDR = \frac{\text{promedio datos recibidos (ent)}}{\text{promedio datos enviados (sal)}} \quad (49)$$

Para esta formulación se determina el valor medio de los datos recibidos como de los datos enviados

Para ellos se utiliza el programa que fue llamado en un principio “routing_cap_lp”, este programa se encarga de enviar las conexiones entre los nodos, y los datos que son enviados y recibidos de cada una de las “SB”. En este programa se aplica las restricciones por enrutamiento de cada una de las “SB” y de la factibilidad de la conexión de cada “SB”. A partir de estas restricciones se calcula los datos enviados y recibidos; También para determinar el valor PDR se realizó un análisis de sistema de colas que nos ayuda a determinar cuál es el porcentaje de todos los envíos de datos y el porcentaje de la recepción de datos fue concluida con éxito y el porcentaje que no se llegó a concluir en la transmisión; es decir aquellos datos que no fue factible su comunicación. Para el análisis de colas se usa la distribución exponencial.

$$P = \lambda e^{-\lambda * PDR} \quad (50)$$

Los datos uplink y los datos downlink nos ayudan a calcular la capacidad promedio de la comunicación, la capacidad promedio uplink y la capacidad

promedio downlink.

Con la curva de tendencias se completa el algoritmo, este algoritmo es el complemento de lo realizado en la sección anterior por lo tanto, también ayuda a mejorar lo expuesto en el literal anterior.

c) Modelamiento de la red con el algoritmo de Greedy para una asignación adecuada de los recursos.

El algoritmo de Greedy, es uno de los algoritmos más conocidos para realizar una asignación de recursos, con la finalidad de obtener una asignación óptima de estos recursos; Por lo tanto el algoritmo de Greedy se utiliza para realizar una asignación de los canales, realizando una asignación adecuada de los usuarios a los diferentes canales. Se realiza esta asignación con la finalidad de dar una solución matemática al problema de asignación y comprobar que puede coexistir la medición inteligente reutilizando el espectro de la tecnología Tv White Space.

El modelamiento se efectúa con parámetros propios de la tecnología, como se mencionó en el capítulo 2; el principal objetivo del modelamiento es no saturar la capacidad del espectro y no producir factores que pueden alterar el funcionamiento adecuado de esta tecnología como por ejemplo ruido en los sub- canales. Para poder tener una mejor comprensión de la asignación usada por el algoritmo de Greedy, se le ha dividido en tres partes fundamentales para una mejor comprensión del funcionamiento, la primera consta del cálculo de los parámetros que influyen directamente en el comportamiento del canal, la segunda parte consta de una asignación de usuarios a los diferentes sub-canales, y la tercera parte del programa devuelve la capacidad de los canales con respecto al tiempo de uso de estos sub-canales. El programa de Greedy fue adaptado de y modificado con la finalidad de realizar un modelamiento de forma óptima y adecuada del algoritmo; para ello se tuvo la guía del siguiente trabajo de estudio [89].

- Calculo de los valores que influyen en la capacidad del canal, Teorema de Shannon

El propósito de esta parte del programa es calcular las variables que influyen directamente en el óptimo funcionamiento de los diferentes sub-canales, cuales

son los parámetros básicos de operación, para ello se lo interpreta el comportamiento del programa de la siguiente manera:

Ingreso de las variables básicas para el funcionamiento del algoritmo como es el caso de: la velocidad de transmisión “kbps”, número de sub-canales “subc”, número de canales “canal”, tiempo de uso del canal “T”, y el rango de frecuencia del cada sub-canal “Fr”, el número de usuarios “usr”.

Se empieza a determinar valores de operación del canal para tener una mejor simulación del comportamiento de los sub-canales; como es el caso de la densidad del espectro del canal, se filtra la información por medio de procesos gaussianos; retardos que pueden existir en la propagación, ruido presente en el sub-canal “ruido”, y la respuesta del sub-canal con respecto al ruido “CHH”, frecuencia de la banda “F”; cada uno de estos parámetros son analizados dependiendo del tipo de entorno, es decir, el análisis puede ser en zonas urbanas, sub-urbanas, rurales; para el caso de análisis se modelo con valores para zonas rurales.

Estos parámetros son importantes para calcular la capacidad del canal sin la afectación del ruido, para ello utiliza el teorema de Shannon, este teorema analiza la máxima cantidad de datos digitales que puede enviarse por un canal sin la afectación del ruido; para ello utiliza la formula descrita a continuación.

$$R = \frac{B}{N} * \log_2 (1 + SNR) \quad (51)$$

$$SNR = \frac{S}{N} \quad (52)$$

De donde se tendría lo siguiente:

R representa la capacidad del canal se representa en [bits/s];

B es el ancho de banda se representa en [Hz]

SNR, Es la relación de la señal de ruido, es adimensional

S, es la potencia del canal se la expresa en [w]

N, es la potencia del ruido debe estar en las mismas unidades de S.

$$H(n) = \sum_{i=0}^n |H_i|^2 \quad (53)$$

De donde se tendría lo siguiente:

H, vendría a ser la capacidad que tendría cada uno de los usuarios.

- Asignación de Greedy usuarios vs canales

En la primera etapa del algoritmo realiza la primera asignación; tras haber culminado de los cálculos que influyen en el comportamiento de los sub-canales; estas variables son utilizadas como valores de entrada del algoritmo planteado; es decir que toma todos los datos obtenidos y ejecuta las siguientes operaciones y restricciones:

$$\text{greedy}(\text{canal}, R, \text{kbps}, H, \text{usr}, \text{subc}, T) \quad (54)$$

Fraccionamiento de los canales disponibles en el número de sub-canales totales “cnl”, y determina los bits disponibles de cada uno de los canales “Rmax”.

Reconstruye la matriz “R”, desde el mayor valor hasta el menor valor de los bits que se van a transmitir “Rmin”.

Para esta asignación “m” se realiza una división y comparación de los bits disponibles del sub-canal con respecto a los bits que se van a transmitir “Rmax/Rmin”. Para ello debe cumplir las siguientes restricciones.

$$\text{length}(m) > \text{usr} \quad (55)$$

Si la primera asignación es mayor al número de usuarios la variable es reiniciada y reasignada “m”.

$$\text{length}(m) < \text{usr} \quad (56)$$

Si “m” en cambio es menor a lo asignado empieza a comprobar que “cnl” tiene capacidad disponible para albergar mayor número de usuarios, para la comprobación se crea una variable que verifica la capacidad de los sub-canales.

$$\text{length}(m) == \text{usr} \quad (57)$$

Su iteración termina satisfaciendo los valores ingresados, realizando una asignación dependiendo de la capacidad de los “cnl”, no congestionando a los sub-canales con la finalidad de obtener una asignación adecuada y óptima del espectro de frecuencia que se desea reutilizar.

- Asignación de Greedy capacidad de los canales

En la segunda asignación “XRCG”, se realiza un proceso idéntico al ya mencionado anteriormente para la primera asignación se vuelve a calcular los parámetros de entrada como por ejemplo, el “F”, “ruido”, “CHH”, con estos parámetros se realiza el cálculo de “R” y “H”; se utiliza de nuevo la función greedy expuesta en la primera asignación, pero se realiza un cambio en la forma de

ingreso de los valores que necesita greedy para operar; este cambio se presenta a continuación.

$$\mathbf{greedy}(\mathbf{canal}, \mathbf{R}, \mathbf{kpbs}, \mathbf{H}, \mathbf{subc}, \mathbf{usr}, \mathbf{T}) \quad (58)$$

Con este cambio realizado se vuelve a calcular las variables ya mencionadas como es el caso del “m” y todas las comparaciones pertinentes; al igual que la primera asignación también debe de cumplir con las siguientes restricciones.

$$\mathbf{length(m)} > \mathbf{usr} \quad (59)$$

$$\mathbf{length(m)} < \mathbf{usr} \quad (60)$$

$$\mathbf{length(m)} == \mathbf{usr} \quad (61)$$

Con la culminación de la primera asignación se comienza con el proceso de verificación de la capacidad de los canales; ya obtenido “m”, se empieza con la segunda asignación para ello analiza y empieza a realizar una nueva reasignación de los parámetros, pero ahora en función de los “subct” y comprobando la capacidad de cada “subct”; para ello posee varios procesos de ejecución y varias restricciones que se menciona a continuación:

$$\mathbf{greedycomplemento}(\mathbf{R}, \mathbf{m}, \mathbf{cnl}, \mathbf{users}, \mathbf{T}) \quad (62)$$

Empieza con una asignación de los “cnl”, a los diferentes “usr” y esta asignación se la conoce como “mm”, esta asignación mostrara el número máximo de “usr” por cada “cnt”; esto debe de cumplir la siguiente restricción:

$$\mathbf{usr} == \mathbf{mm} \quad (63)$$

Vuelve a evaluar los valores almacenados en “Rmin” con la finalidad de obtener la tasa máxima de transmisión por cada “cnl” en un “T”, esto ayudara a calcular la capacidad de cada “cnl”.

Se realiza los cálculos necesarios para encontrar la tasa de transmisión “G” requerida para cada uno de los “cnl”, para encontrar esta tasa debe de cumplir las siguientes comparaciones de uso:

$$\mathbf{mm} < \mathbf{m} \quad (64)$$

$$\mathbf{subcuser}(\mathbf{subct}, \mathbf{usr}) == \mathbf{max}(\mathbf{subcuser}) \quad (65)$$

Con la determinación de la capacidad de cada uno de los “cnt”, se procede a la asignación de los respectivos valores de “XRCG”; para ello se procede a comparar

la “G” con los valores mínimos de la variable con respecto a cada uno de los “cnt”, esta asignación debe de cumplir varias condiciones del caso:

$$G = \sim 0 \quad (66)$$

$$G(i) = \min(G(i)) \quad (67)$$

Con estas restricciones se procede a determinar los valores de “XRCG” y la reasignación de “mm”; el proceso de asignación terminará cuando las variables “m” y “mm” cumplan con la siguiente restricción.

$$m = mm \quad (68)$$

Con el cumplimiento de las restricciones, el algoritmo devuelve los valores para la comprobación de la capacidad de cada uno de los sub-canales, y de esta manera determinar la capacidad de los sub-canales de acuerdo al número de usuarios y a las características de la tecnología modelada.

3.4 Simulación de redes inalámbricas para infraestructura de medición avanzada en zonas rurales.

Con los análisis de los modelamientos planteados en la anterior sección, se realizó la programación de los modelamientos citados anteriormente para comprobar la efectividad de los algoritmos expuestos; la simulación tanto para una red de fibra óptica que se utilizó los algoritmos de dijkstra y kmeans, como para una red inalámbrica que se utilizó el algoritmo de greedy; para ello se obtuvo las siguientes simulaciones que se expondrán a continuación.

a) Simulación de la red con los algoritmos de Dijkstra y Kmeans para un ruteo optimo

Cada uno de los análisis presentados nos sirven para determinar el comportamiento de la red de fibra óptica en diferentes escenarios, cada uno de los algoritmos utilizados facilitan el análisis del comportamiento de la red de fibra óptica, como se comporta en diferentes medios o estados de las redes; para culminar con el análisis de estos dos algoritmos por medio del modelamiento presentado; a continuación se presenta el pseudocódigo para los casos expuestos anteriormente; cada uno de los casos analizan una temática, una forma de operación y un comportamiento en específico por esto se presenta un pseudocódigo de cada uno de los modelos empleados y explicados.

- Modelo de análisis óptimo sin la influencia de pesos en las líneas de comunicación.

La finalidad de realizar una simulación de la red sin pesos es conocer, el óptimo comportamiento de la red en el caso de no existir impedimentos en las líneas; es decir que las líneas se encuentran en plena operación óptima, que se encuentren operando en condiciones normales; para este caso en particular se presenta el pseudocódigo expuesto a continuación.

Algoritmo de ruteo óptimo

Paso 1: Asignación de SC, CO, SB, EC

Paso 2: **For** i = 1 a Nusr

For j = 1 a Nusr

dist = distancia entre los CG

Paso 3: **IF** dist = 0 **Then** dist = inf

IF dist > 150 **Then** dist = inf

Paso 4: **While** Nusr > MaxUSr && Nurs < MinUsr

Kmeans (CG; k). Problema Primario-Cluster

Paso 5: **For** i = 1 a SB

For j = 1 a SB

distp = distancia entre SB

Paso 6: **IF** distp = 0 **Then** distp = inf

IF distp > 150 **Then** distp = inf

Paso 7: **Dijkstra** (CO, SB, SC, distp);

Problema Secundario, Ruta óptima

- Modelo de análisis óptimo con influencia de pesos en las líneas de comunicación.

El modelo expuesto anteriormente hace el análisis con influencia de pesos en las líneas, este peso afecta al comportamiento de la comunicación; este peso puede representar algún impedimento que causo que la línea no se encuentre operando en condiciones normales, por ese motivo es de gran importancia el modelamiento planteado; para tener un mejor entendimiento del uso de los algoritmos y la función que cumple el modelamiento, para este caso donde existe un peso en las líneas de comunicación se presenta a continuación el pseudocódigo pertinente.

Algoritmo de ruteo óptimo

Paso 1: Asignación de SC, CO, SB, EC
Paso 2: **For** i = 1 a Nusr
 For j = 1 a Nusr
 dist = distancia entre los CG
Paso 3: **IF** dist = 0 **Then** dist = inf
 IF dist > 150 **Then** dist = inf
Paso 4: **While** Nusr > MaxUSr && Nurs < MinUsr
 Kmeans (CG; k). Problema Primario-Cluster
Paso 5: **For** i = 1 a SB
 For j = 1 a SB
 distp = distancia entre SB
Paso 6: distp = (distp/dmax)>dpeso;
Paso 7: **IF** distp = 0 **Then** distp = inf
 IF distp > 150 **Then** distp = inf
Paso 8: **Dijkstra** (CO, SB, SC, distp);
 Problema Secundario, Ruta óptima

- Análisis del modelo óptimo, optando que no existe restricción en la red de comunicación.

Para concluir con el modelamiento presentado, se realiza una simulación en donde se considera un escenario ideal, es decir, en donde las restricciones de pesos en las líneas, como la comunicación entre nodos de concentración y empresas de distribución no es obligatorio, es decir que existe la comunicación de forma inalámbrica entre las empresas de distribución; y forma alámbrica con los nodos de comunicación; para comprender de mejor forma se presenta a continuación el pseudocódigo del modelado presentado.

Algoritmo de ruteo óptimo

Paso 1: Asignación de SC, CO, SB, EC
Paso 2: **For** i = 1 a Nusr
 For j = 1 a Nusr
 dist = distancia entre los CG
Paso 3: **IF** dist = 0 **Then** dist = inf
 IF dist > 150 **Then** dist = inf
Paso 4: **While** Nusr > MaxUSr && Nurs < MinUsr
 Kmeans (CG; k). Problema Primario-Cluster
Paso 5: **Dijkstra** (CO, SB, SC, distp);
 Problema Secundario, Ruta óptima

Cada uno de los pseudocódigos presentan variaciones de programación, estas variaciones hacen que el comportamiento de la red varíe, y se comporte de diferentes maneras; cada pseudocódigo presentado analiza un escenario diferente

de comportamiento de la red; y nos da una mejor visión de forma analítica de los diferentes comportamientos de las redes alámbricas.

b) Simulación de la red con el algoritmo de Dijkstra y flujo de tráfico a partir del programa Lp solve

La simulación del algoritmo presentado ayuda a mejorar la comprensión de los flujos de tráfico y de una mejor comprensión del algoritmo de Dijkstra. Con la finalidad de poseer un mejor análisis de lo expuesto en la sección 3.3 en el literal b, se pretende mostrar el pseudocódigo pertinente del proceso expuesto en la sección mostrada.

Algoritmo de Dijkstra y flujo de trafico

Paso 1: N=300, dmin=0.3; cap=10;
Paso 2: fopen ('mst.lp', 'w'); restricciones
fopen ('routing_cap.lp', 'w');
Paso 3: **While Flag==0**;
Calculo de x, y, dist (valores randomicos).
Paso 4: Función objetivo, restricciones
Paso 5: **Dijkstra** (orig,dest, dist); ruta optima
Paso 6: disponible, ocupado, traf
Paso 7: **While** t ~= orig
disponible - enviosdatos < enviosdatos
ruta factible
Paso 8: (ent)/ (sal); función PDR
Paso 9: $\lambda e^{(-\lambda * PDR)}$; sistema de cola

c) Simulación de la red con el algoritmo de Greedy para una asignación adecuada de los recursos.

Para una red inalámbrica posee varias formas de comprobar su efectividad y tener un análisis del comportamiento del uso del espectro; en el modelamiento presentado en la sección 3.3 se presentó un escenario en donde se pretende comprender el comportamiento de los canales y conocer la capacidad del canal de acuerdo a las datos ingresados y a la tecnología que se pretende usar; los datos que se presentan a continuación son los que se utilizaran para las simulaciones y aparte se utiliza tecnología de mencionada en el capítulo 2, en la sección 2.4.

	Primer caso	Segundo caso
usuarios	2000	500
canales	2	2
División de cada canal	16	16

Velocidad de envío	4.15 Mbps	4.15 Mbps
Tiempo de uso de los sub-canales	7	15
Frecuencia de cada sub-canal	6 MHz	6 MHz

Tabla 3.4. Datos del modelamiento del algoritmo de Greedy

De expuesto anteriormente y del modelado presentado, se realizan las simulaciones respectivas; para una mejor comprensión se presenta un pseudocódigo por cada uno de los análisis presentados en la sección 3.3; sus análisis serán las siguientes: primer análisis realizado por el algoritmo para una asignación de usuarios versus canales y el segundo análisis para la asignación es de la capacidad de los canales.

- Asignación de Greedy usuarios vs canales

El análisis mencionado determina una asignación adecuada tanto de los usuarios, como del canal y sub-canales para el envío de información; es indispensable conocer en la distribución de los usuarios en este caso medidores inteligentes en la disponibilidad de canales planteados pero para tener una mejor comprensión del modelamiento y del algoritmo planteado se presenta el pseudocódigo utilizado.

Algoritmo asignación de usr vs subc

Paso 1: **For** c=1: C canal; **For** t=1: T; **For** i=1: usr;
 Calculo de I, ruido (T), CHH (C, T)
 Paso 2: **For** c=1: canal; **For** t=1: T; **For** i=1: usr;
 Calculo de R (teorema de shannon), H.
 Paso 3: **greedy** (canal, R, kbps, H, usr, subc, T);
 Primera asignación usr vs subc.
 Paso 4: **IF** m > usr or m < usr **THEN**
 Ir al Paso 3.

- Asignación de Greedy capacidad de los canales

En una segunda asignación por medio del algoritmo de greedy lo importante es conocer cuánto es el número de medidores se puede albergar en un sub-canal, sin afectar el comportamiento adecuado del canal; para ello se presenta el siguiente pseudocódigo.

Algoritmo de asignación capacidad de los canales

Paso 1: **For** c=1: C canal; **For** t=1: T; **For** i=1: usr;
 Calculo de I, ruido (T), CHH (C, T)

Paso 2: **For** c=1: canal; **For** t=1: T; **For** i=1: usr;
 Calculo de R (teorema de shannon), H.

Paso 3: **greedy** (canal, R, kbps, H, usr, subc, T);
 Primera asignación usr vs subct.

Paso 4: **IF** m > usr or m < usr **THEN** Ir al paso 3

Paso 5: **greedycomplemento** (R, m, cnl, usr, T)
 Comprobación de la capacidad del canal.

Paso 6: **IF** m > mm **OR** m < mm **THEN** Ir al paso 5

CAPÍTULO IV

IV. PROGRAMACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA

Los análisis de esta sección se basan en tres puntos fundamentales que son; la capacidad de las redes inalámbricas para el envío de la información que requiere las empresas de distribución, el tráfico que se produce por un incremento repentino del número de clientes alojados en la red inalámbrica; la cobertura necesaria para brindar el servicio de medición inteligente. También en esta sección se abarca la expansión de las redes inalámbricas y el plan de negocios con la finalidad de prestar el servicio de medición inteligente en los sectores rurales.

4.1 Análisis de cobertura en zonas rurales

De acuerdo a la cobertura expuesta en forma de tablas e ilustraciones en la sección 3.2: y las ilustraciones que se presentan a continuación; se realiza un análisis de la cobertura de la tecnología TV White Space, si tiene la capacidad de albergar un servicio de medición inteligente en los diferentes zonas rurales, como se explicó anteriormente en el Ecuador se encuentra en transición para la migración de la tecnología análoga a digital, esto reduce el uso del espectro y beneficia en otros servicios que se pueden implementar, la tabla 3.1 y figura 3.1 como la tabla 3.2 y figura 3.2 hace referencia al uso del espectro en mayor congestión, con lo que se posee una saturación del espectro en un 60% sacando un aproximado, esto nos favorece ya que no existe una congestión neta del espectro; es decir que existe huecos blancos no utilizados; también haciendo referencia a las tablas e ilustraciones 3.3 podemos conocer la cobertura neta de en cada una de las provincias tanto para tecnología UHF, como la VHF; y las provincias con mayor cobertura se encuentran en Manabí, Pichincha, Azuay, Guayas, de las cuales también Manabí, y Guayas poseen mayor índice de pérdidas totales en el sistema de distribución; con el apoyo de las ilustraciones que se presentan a continuación, muestra el uso de la tecnología TV White Space; Las ilustraciones expuestas a continuación hacen referencia a la capacidad de la

tecnología en este caso TV White Space para albergar los medidores inteligentes, para ello se presenta los dos casos de modelamiento mencionados en la sección 3.4 literal b.

a) Análisis de la saturación de los canales de la tecnología TV White Space de acuerdo a la cobertura de la tecnología

Para el primer caso se presentan los datos ilustrados en la sección mencionada, las gráficas pertinentes a este caso son las siguientes:

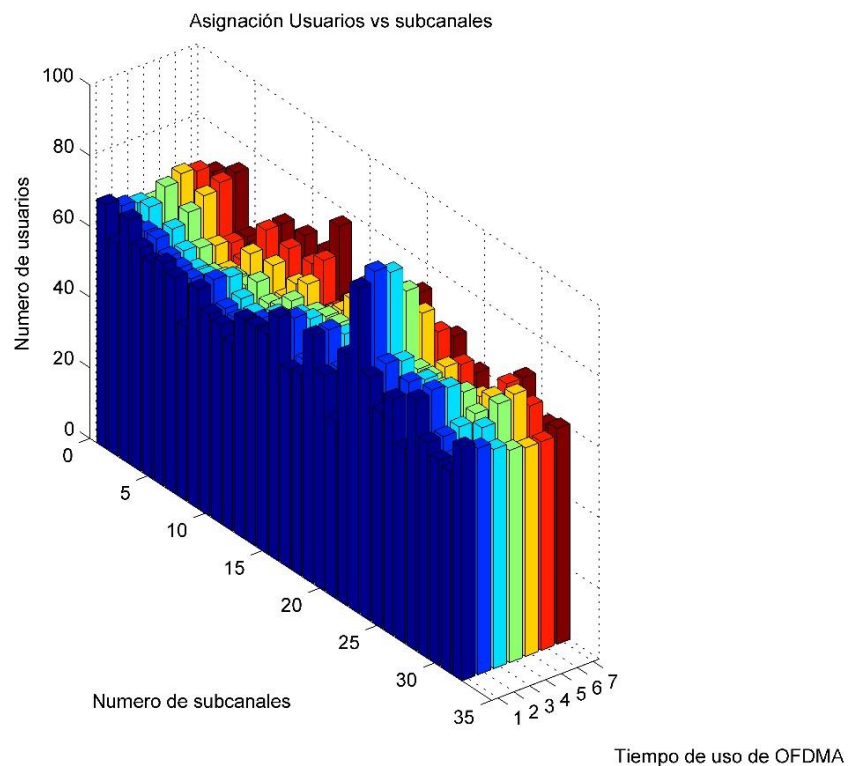


Figura 4.1. 2000 medidores para 2 canales y 16 sub-canales

En la figura 4.1 ilustra la asignación realizada de los usuarios, dependiendo del número de canales, y del tiempo de uso de cada uno de los canales, asumiendo que se tiene dos canales de los cuales se les ha dividido en 16 sub-canales a cada canal, para un número total de 2000 medidores es factible albergarlos y darles el servicio requerido para el envío de la información, como los análisis se realizan para un sector rural, se determinó realizar la simulación con 2000 medidores ya que la población se encuentra alejada de las provincias no existe mucha sobrepoblación como para saturar las redes. Para complementar el análisis se presenta a continuación la figura 4.2.

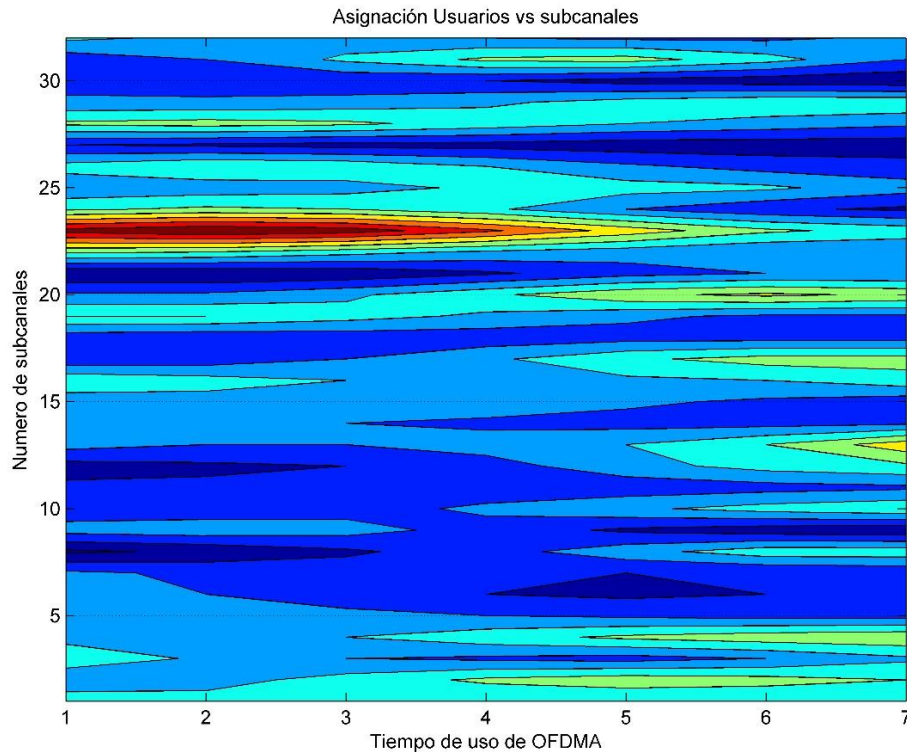


Figura 4.2. Visualización del contorno de saturación de la figura 4.1

Para la figura 4.2 se determina por medio de contornos, el nivel de saturación que existe en cada uno de los sub-canales; para lo cual podemos apreciar que los colores claros no existe congestión y los colores fuertes existe una congestión, es decir ahí se alberga mayor usuarios, pero no existe interferencia entre ellos. Por lo tanto se puede observar tanto en la figura 4.1 como en la figura 4.2 que existe una saturación de los sub-canales 22 al 24 durante el los primeros tiempos de uso de los sub-canales.

Segundo caso expuesto en la sección 3.4 literal b. se presentan las siguientes simulación que nos muestran el número de usuarios por sub-canal sin interferir en el envío de la información entre los medidores. La figura 4.3 refuerza lo visto con la figura 4.1, la simulación se la realiza para un número menor de usuarios 500 y el tiempo de uso del canal de 15, número de canales 2, y sub-canales por cada canal de 16. La representación se muestra a continuación.

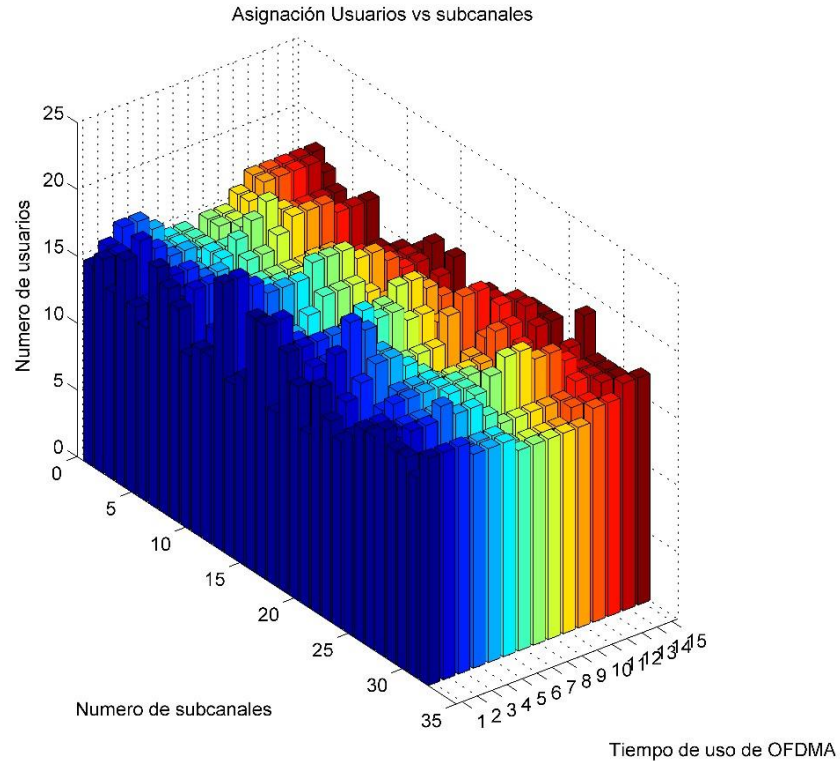


Figura 4.3. 500 medidores para 2 canales y 16 sub-canales

La ilustración anterior se puede apreciar con gran claridad la gran diferencia entre una simulación con un numero de 500 usuarios a una de 2000 usuarios, como la congestión varia, dependiendo del número de usuarios que se desea albergar en los diferentes sub-canales, a pesar que el tiempo de uso del canal se aumentó no le afecto en la saturación de los canales. También se puede apreciar que existe una semejanza con la figura 4.1 ya la asignación realizada en cada intervalo es semejante menos en los picos presentados en la figura 4.1 en donde existe mayor aglutinación de los medidores, pero en la figura 4.3 el uso de los sub-canales es más homogéneo, gracias a que no existe muchos medidores para la asignación, se optó por este número de medidores por ser un sector rural en donde una conglomeración de viviendas no es muy pronunciada, para una mejor comprensión de la figura 4.3, se presenta a continuación el contorno de congestión de este caso presentado.

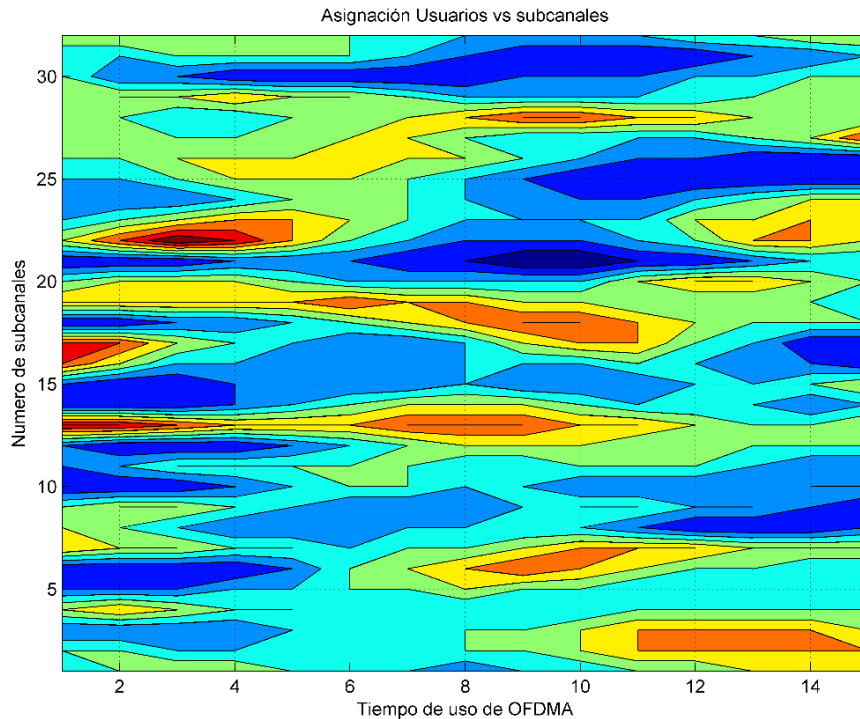


Figura 4.4. Visualización del contorno de saturación de la figura 4.4

Como ya se detalló anteriormente su congestión es más homogénea, por la razón de que en este caso en número de medidores es menor, esto ayuda a que el espectro no se utilice con mayor medida, se puede apreciar en esta figura que no existe saturaciones tan prominentes como en la figura anterior, su saturación es más esparcida, a pesar de un aumento en el tiempo de uso de los sub-canales. También cabe recalcar que aparecen colores más claros que representan una ocupación de los sub-canales de forma más reducida.

b) Análisis de la capacidad de los canales de la tecnología TV White Space de acuerdo a la cobertura de la tecnología

De la misma manera presentada anteriormente se presenta los dos casos planteados en la sección 34. Literal b. aquí lo que se desea comprobar es la capacidad de cada uno de los sub-canales que se le dividió a los canales; asignación va a mostrar la capacidad que posee un canal de acuerdo a los datos ingresados previamente de la simulación; a continuación se mostrara lo que se obtuvo tras las simulaciones realizadas de este algoritmo.

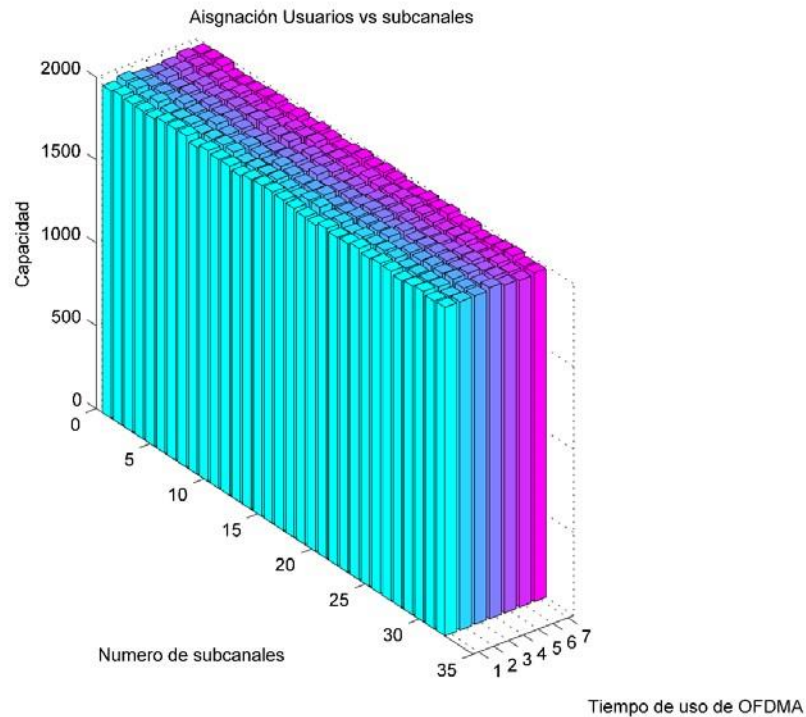


Figura 4.5. Capacidad de los sub-canales, asignación de 2000 usuarios

En la figura 4.5 se puede apreciar la capacidad que se tendría con un número de 2000 medidores, esta figura complementa lo expuesto en el anterior literal, en donde se observaba el uso de los sub-canales, aquí podemos observar que puntos son de mayor congestión si se utiliza la capacidad máxima de cada uno de los sub-canales. Con la figura 4.1 y la figura 4.5 podemos determinar que en cuanto a la utilización de la capacidad máxima de los sub-canales son en determinados intervalos de tiempo, el resto de sub-canales se encuentran operando en condiciones normales, en donde existe una utilización máxima de los sub-canales se encuentran en el canal 2, sub-canal 20 al 25 de acuerdo a las figuras presentadas; para una mejor comprensión se presenta la figura 4.6 en donde se puede apreciar de mejor manera lo expresado.

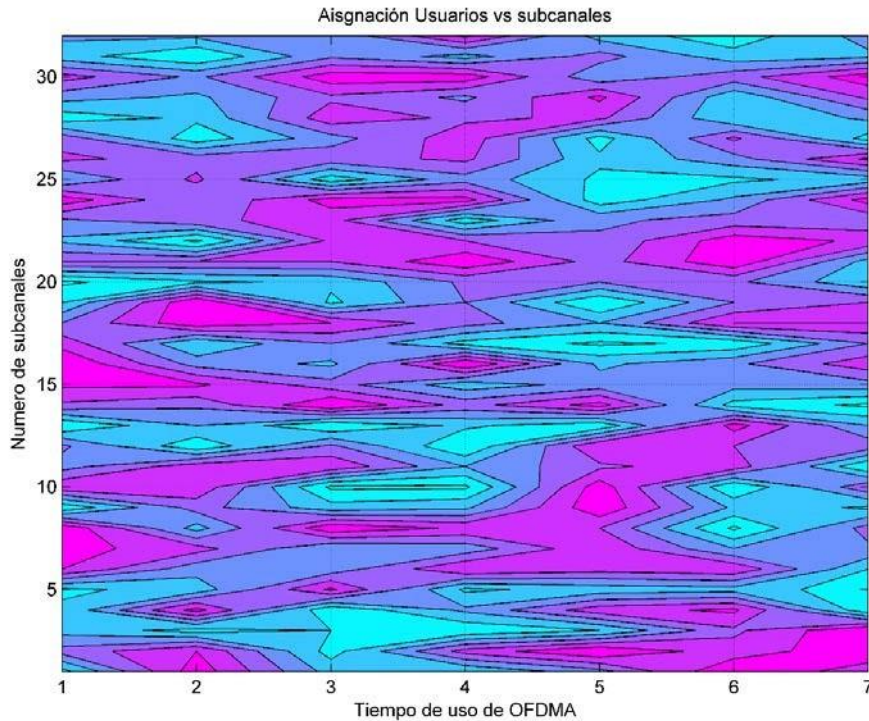


Figura 4.6 Visualización del contorno de saturación de la figura 4.5

Gracias a la figura 4.6 se puede comprender de mejor manera lo dicho anteriormente, aquí se puede verificar que cada sub-canal reacciona al número de medidores albergados, en donde se los colores que mayor predominan demuestran la capacidad de los medidores, con respecto a la capacidad demandada de cada uno de los medidores albergados en cada uno de los sub- canales provistos para brindar el servicio de medición inteligente, si se realiza un análisis de las figuras 4.2 y la figura 4.6 se puede ver como las dos figuras se complementan y comprobar que en ciertos intervalos de tiempo, y en cierto números de sub-canales existe un uso al máximo de la capacidad de los sub- canales.

Para el segundo caso expuesto se presenta de forma similar al anterior, pero con los datos ya mencionados del segundo caso; también se podrá verificar y se realizara un análisis del caso pertinente y una comparación de los dos casos mencionados para este algoritmo, a continuación se podrá visualizar lo obtenido para los datos presentados en la sección 3.4 literal b, caso dos.

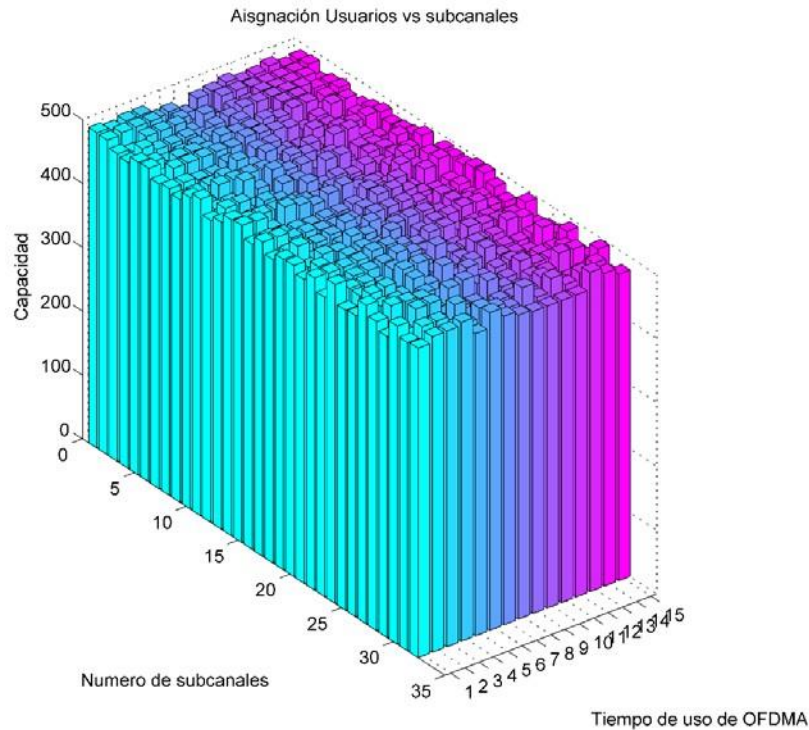


Figura 4.7 Capacidad de los sub-canales, asignación de 500 usuarios

Para los datos planteados y ya mencionados, por medio de la figura 4.7 podemos destacar al igual que la figura 4.5 como se determina la capacidad de los sub-canales con las características del caso; también se puede apreciar como varia la capacidad dependiendo al número de usuarios asignados, mientras que un incremento del tiempo de uso de los sub-canales no afectan en la óptima operación de la tecnología. Es decir que el tiempo de uso del canal solo refleja una pequeña variación en la capacidad de cada uno de los sub-canales, con lo que podemos concluir es que cuando existe un mayor ocupación del espectro, el ultimo usuario es reasignado con la finalidad de no afectar el óptimo servicio que se encuentra brindando; para tener una idea más clara de cómo se encuentra la capacidad de los sub-canales se presenta a continuación el contorno de la figura 4.7 en donde se puede apreciar de mejor forma la capacidad para el caso mencionado; como va variando la capacidad de los sub-canales conforme se va saturando el rango de frecuencia establecida.

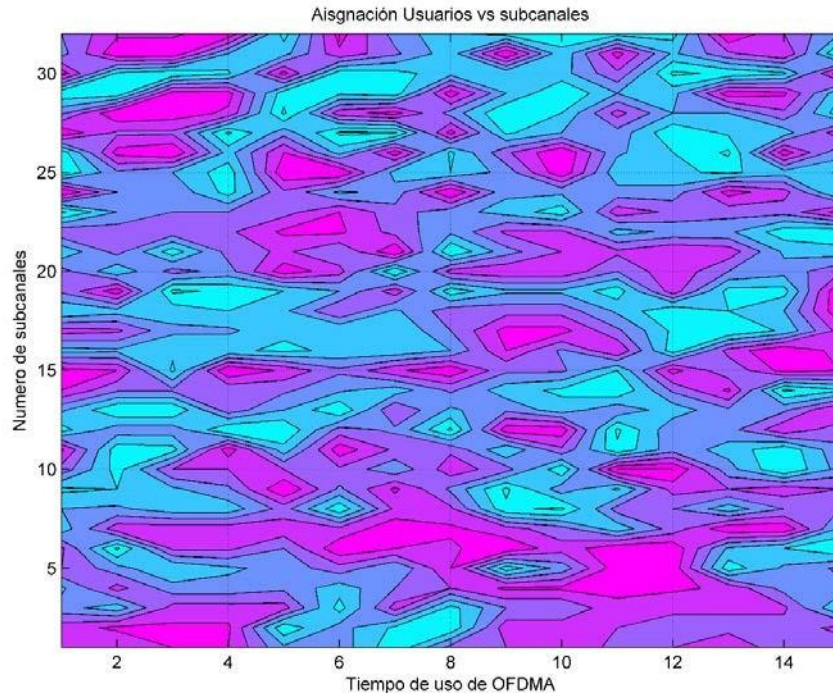


Figura 4.8. Visualización del contorno de saturación de la figura 4.7

La figura 4.8 nos muestra no que se mencionó como va modificando su capacidad de acuerdo a los medidores que va albergando, como los va asignando a nuevos sub-canales cuando esta propenso a llegar a una saturación del servicio que se encuentra prestando. También podemos comprobar al igual que las demás figuras que mientras mayor ocupación de los sub-canales se va oscureciendo más la gráfica. Realizando un análisis de la figura 4.6 con la figura 4.8, podemos determinar cuáles son los sub-canales con mayor ocupación del espectro. Esto ayuda a comprobar que sitios requiere una reasignación de los medidores para mejorar el servicio prestado.

Para completar con el análisis presentado, podemos verificar en las diferentes figuras presentadas en esta sección que la capacidad del canal va a depender de los medidores que deseamos albergar, para una zona rural, 2000 medidores y 2 canales es factible el envío, con consumo del espectro adecuado en casi todos los sub-canales, con un mínimo de medidores que consumen casi en su totalidad el espectro, pero gracias al algoritmo planteado en los casos de mayor consumo les reasigna a aquellos sub-canales que todavía posee espacio para albergar mayor número de medidores. Pero en cambio cuando se realiza la simulación con un

mínimo de medidores como fue el caso de 500, su asignación es casi homogénea en los sub-canales, ya que tiene todo el espectro que le asigno para el envío de la información sin la necesidad de congestionar algún sub-canal, esto ayuda a mantener la confiabilidad del sistema de comunicación y poder determinar un consumo óptimo del recurso, sin la necesidad de incorporar más canales para brindar el servicio que se desea implementar.

4.2 Análisis del crecimiento de la infraestructura de comunicaciones celulares con enfoque en operadores móviles virtuales.

Un análisis detallado de la infraestructura que se va a reutilizar se debe de conocer cómo se encuentra el servicio sin la implementación de la medición inteligente, con lo expuesto en el capítulo 3 se aprecia las condiciones normales de operación de la tecnología para el uso del espectro de la televisión, cual es la capacidad que posee y como se encuentra distribuido la infraestructura por cada uno de las diferentes provincias, con sus respectivas estaciones base como las repetidoras que poseen. También desde otro punto de vista cambiando de tecnología podemos observar cómo se encuentra distribuido las conexiones de fibra óptica en el Ecuador, esta conexión de fibra óptica pasa por diferentes puntos estratégicos con la finalidad de tener una comunicación confiable y segura, por ello se presenta a continuación los análisis respectivos con respecto a la reutilización de la fibra óptica para enlazar las empresas de distribución con el fin de optimizar el uso del recurso. Para la simulación de la red con los algoritmos mencionados, y con lo ya planteado en la anterior sección, se debe de dividir en 2 partes fundamentales; la primera determina como se encuentra las conexiones de las empresas a la red de fibra óptica y la segunda un análisis del modelamiento planteado en el capítulo 3, sección 3.3 y 3.4.

a) Estado actual de la red de fibra óptica

Antes de empezar con las simulaciones se presenta de forma ilustrada como se encuentra el ruteo actual de fibra óptica esta red de fibra óptica se encuentra bajo la propiedad de la empresa TransElectric P.E., las simulaciones parten de este ruteo para el envío de los datos a cualquier empresa de distribución que requiera. También se debe mencionar que cada uno de los puntos se encuentra

georreferenciados, con la ubicación de las empresas propias de las empresas, y fueron ubicadas en las figuras siguientes para la simulación, pero la empresa que se encuentra en Galápagos fue desplazada para tener una mejor visualización, y una mejor comprensión del análisis que se presenta en esta sección.

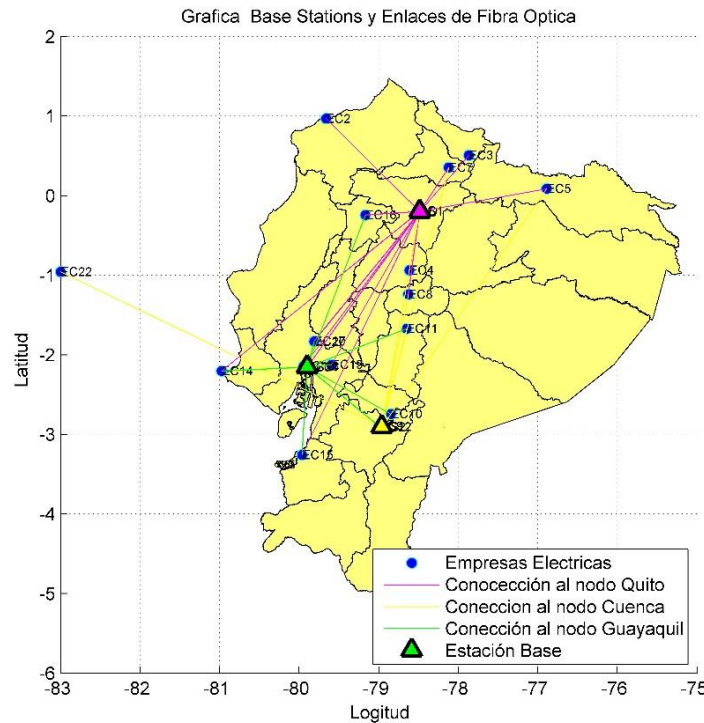


Figura 4.9. Estado actual de la red de fibra óptica

En la figura 4.9 se observan las conexiones que existen entre las empresas de distribución a los puntos de conexión que existen en la red, estos puntos se encuentran ubicados en Cuenca, Guayaquil y Quito; son los puntos de interconexión para cada una de las empresas eléctricas de distribución, la finalidad de usar la red de fibra óptica, es por su velocidad de envío de la información, también se puede apreciar que existe un anillo de conexión entre las 3 estaciones base; esta red de conexión tiene mayor ancho de velocidad que la conexión de las empresas de distribución hacia las estaciones base.

b) Análisis de la red de fibra óptica a través de un ruteo óptimo

Para el análisis de red de fibra óptica a través de un ruteo óptimo se presentan 3 casos; cada caso fue presentado en el capítulo 3 sección 3.3; en donde se presentan los casos siguientes: modelo de análisis óptimo sin la influencia de

pesos en las líneas de comunicación, un modelo de análisis óptimo con la influencia de pesos en las líneas de comunicación y por último en donde no existe restricción en la red de comunicación.

- Modelo de análisis óptimo sin la influencia de pesos en las líneas de comunicación

Para el caso siguiente se presenta de forma ilustrada la simulación del modelamiento pertinente que se realizó en la sección anterior, en donde no se le establece ningún tipo de peso en las líneas.

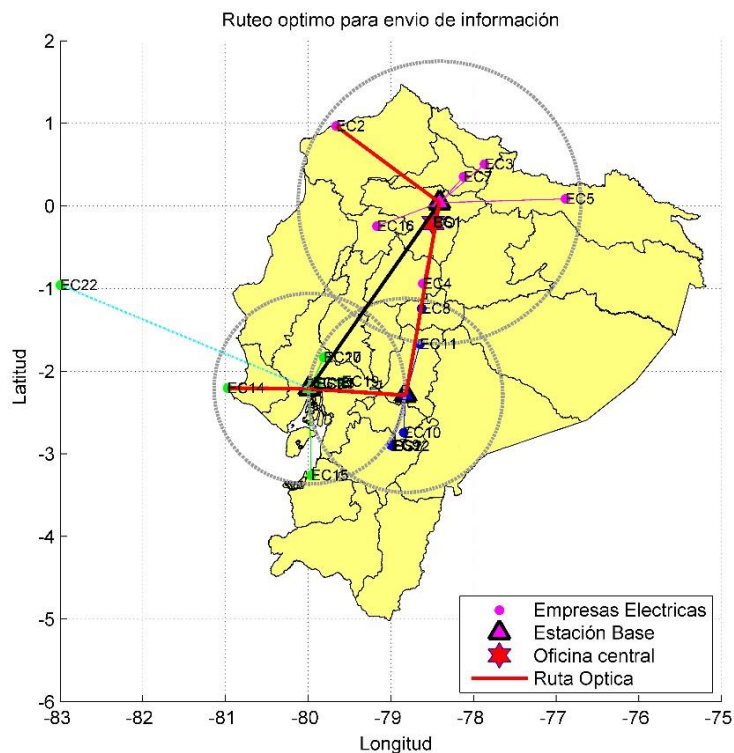


Figura 4.10. Ruteo óptimo sin la influencia de pesos en la red de fibra óptica

En la figura 4.10 se aprecia una simulación sin pesos, esto quiere decir que no existe restricciones para el uso de las líneas, estas restricciones pueden ser tomadas como un factor que impide el pleno funcionamiento de la red, entonces para ello elige el ruteo más adecuado para el envío de la información desde un sitio determinado, en este caso se presenta el envío desde la empresa distribución de Santa Elena, hasta la empresa de distribución que se encuentra en Esmeraldas. También presenta la cobertura para el envío de los datos, como la

red de anillo entre las estaciones base poseen una mayor velocidad de transmisión se obliga a que las empresas de distribución pasen por esta red con la finalidad de que no afecte ni sature las comunicaciones. Como se conoce la red de fibra óptica se encuentra prestando o brindando otros servicios como medio de comunicación.

- Modelamiento es de manera óptima con influencia de pesos en las líneas de comunicación.

Para la presentación de las simulaciones tomando en cuenta pesos en las líneas de comunicaciones de fibra óptica se optó por simular con un peso de 0.45; el peso mínimo es de cero y el peso máximo es de 1; cero cuando no existen pesos en las líneas y 1 cuando es el mayor peso.

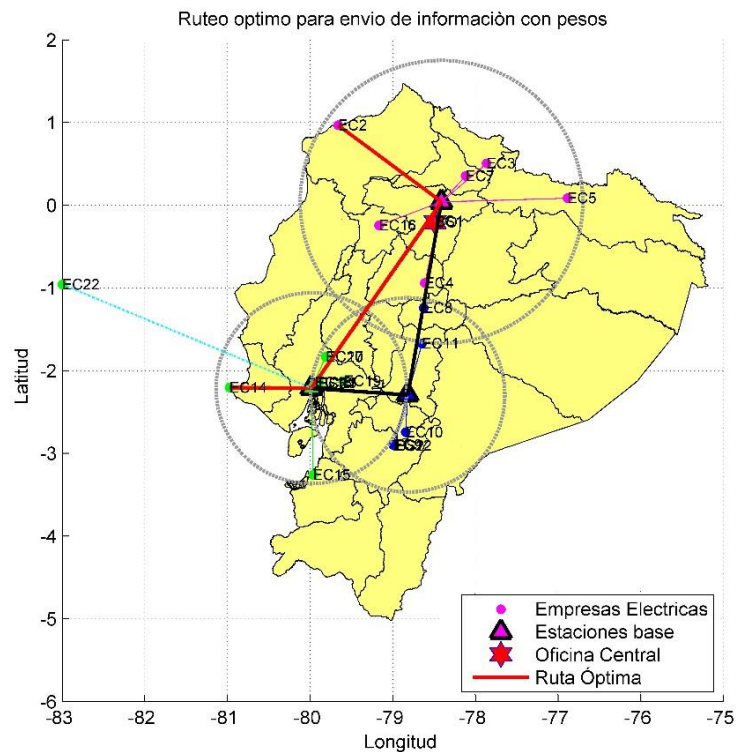


Figura 4.11. Ruteo óptimo con un peso de la línea de 0.45

Cuando mencionamos un peso en la línea, el envío de la información es restringida a buscar otra forma de llegar a su destino, por ese motivo cuando se incluye un peso considerable como es de 0.45 se observa como la forma de envío de los datos es modificada, utiliza otra ruta para el envío, que posiblemente esta

ruta no es la óptima para el uso, pero es la que se encuentra totalmente disponible en ese instante, para poder realizar un buen análisis del uso de pesos en las líneas se presenta a figura 4.12 esta figura detalla para otros posibles pesos, con esto se quiere tener una mejor visualización de lo ya mencionado, es decir cuáles son los posibles casos que pueden presentarse cuando se desea enviar la información desde una empresa de distribución a otra empresa o un punto de almacenamiento, como por ejemplo la oficina central.

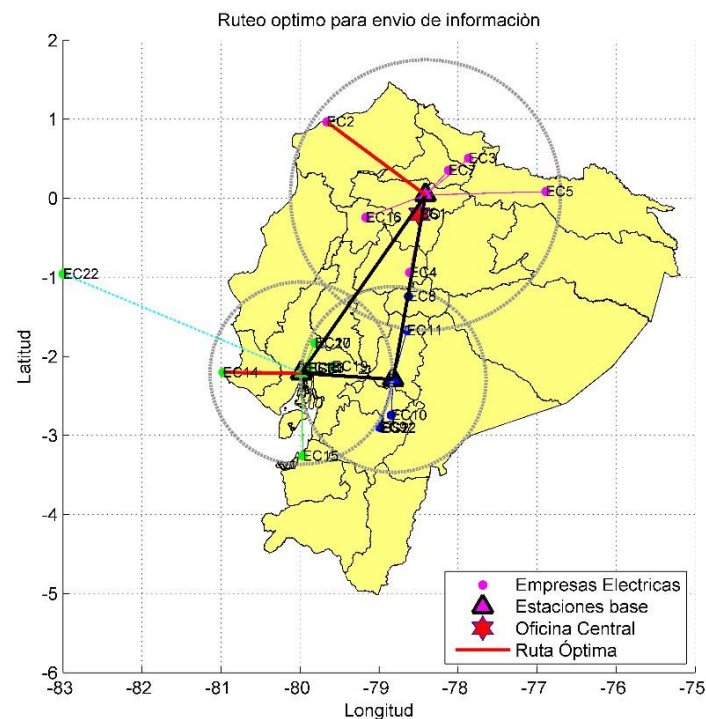


Figura 4.12. Ruteo optimo con un peso de la línea de 1

Cuando se menciona o se hace referencia de un peso de uno es cuando existe el mayor peso en las líneas, por lo tanto como podemos apreciar en la figura 4.12 va hacer imposible de transmitir la información, en ese caso lo único que se puede realizar es esperar que el peso de la línea disminuya con la finalidad de poder transmitir; por ese motivo gráficamente solo se puede observar que existe comunicación de las empresas de distribución hacia el nodo de concentración, pero la comunicación entre los nodos no es factible. Otro caso de análisis es cuando el peso de las líneas es cero, este caso es lo mismo que decir que no existen la influencia de un peso en las líneas de comunicación, pero este caso ya

fue analizado anteriormente; por tal motivo no se lo realiza una ilustración de este caso mencionado.

- Un modelamiento optimo, optando que no existe restricción en la red de comunicación.

Para esta última simulación de estos algoritmos se presenta una representación gráfica en donde no existen restricciones en las conexiones, donde no es obligatorio el paso por las estaciones base, sino que se pueden conectar entre empresas de distribución. La conexión entre las empresas de distribución no existe una conexión directa, es un caso ideal, en donde se puede optar por realizar la conexión de forma inalámbrica o alámbrica, ya sea por fibra óptica mismo, o por redes celular, redes satelitales; es un caso ideal que se presenta, en donde se trata de minimizar el uso de las conexiones y brindar mayor confiabilidad al envío de los datos.

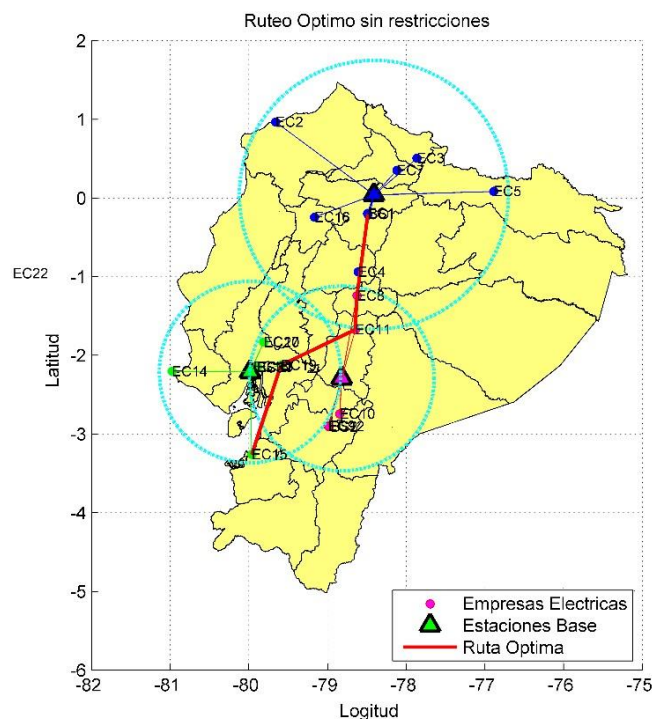


Figura 4.13. Ruteo optimo sin condiciones ni restricciones de uso de las líneas

La figura 4.13 hace referencia a lo expuesto, se puede observar un modelo ideal en donde las restricciones del uso de la fibra óptica, no existen, ya que existe una conexión entre las empresas de distribución, este tipo de conexión hace disminuir

el tiempo de envío de la información, ya que puede optar enviar la información por diferentes medios; un ejemplo de este caso sería una verificación tanto de la red de fibra óptica o la red inalámbrica (red celular, TV White Space), cual se encuentra disponible para el envío de la información, así se está mejorando la confiabilidad del envío de la información y asegurando una disponibilidad total de las infraestructuras.

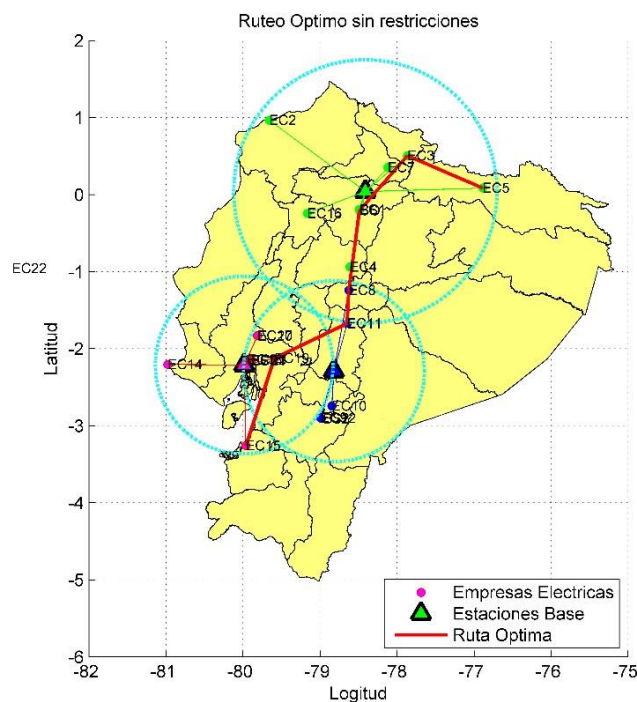


Figura 4.14. Ruteo optimo sin condiciones ni restricciones de uso de las líneas

Al igual que la figura anterior, la figura 4.14 hace referencia a lo ya expuesto. Tanto la figura 4.13 como la figura 4.14 es una simulación ideal, tratando de optimizar el tiempo de uso y la disponibilidad de los recursos, teniendo un sistema de comunicación confiable en caso de que uno de los medios de comunicación se encuentren indisponible para el envío de la información; este caso se analiza como una forma de mitigar el caso anterior, asumiendo que exista pesos en las líneas de comunicación, es decir, la figura 4.12 presenta un análisis del envío de información pero cuyo peso de la línea es de 1. En este caso particular no se puede transmitir los datos, y la solución es esperar para enviar la información; pero en cambio sí se posee una comunicación entre las empresas de distribución,

tal como se presenta en las figuras 4.13 y 4.14, se puede enviar la información desde cualquier empresa de distribución y así facilitando la utilización de las tecnologías disponibles en ese instante de tiempo.

c) Análisis de las redes de comunicaciones a través de una ruta óptima y flujos de carga

Para el análisis de esta sección se ha determinado de una ruta optima empleando flujos de carga se puede apreciar las siguientes graficas que se presentara a continuación. Cada ilustración presenta un escenario diferentes de análisis y como va variando a los diferentes parámetros expuestos en las sección anterior.

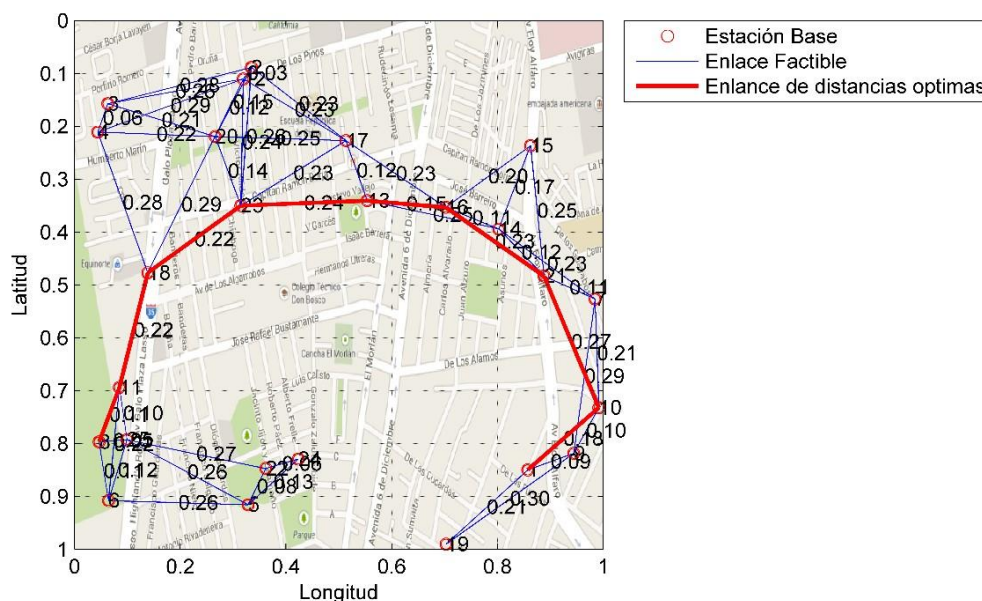


Figura 4.155. Conexión optima por medio de distancias mínimas de enlace

Las conexiones factibles son aquellas conexiones por donde se puede enviar la información; esta conexiones pueden estar disponibles, para el envío de los datos, esto va a depender que tan congestionada se encuentre la red, o el nivel de uso en un instante determinado. Este proceso ya se demostró en el análisis anterior, en ello solo se relaciona con la distancia más corta para el envío de la información requerida de las empresas de distribución, no evalúa el nivel de tráfico que pueda estar en cada una de las rutas de conexión, es un resultado muy poco probable ya que la ruta mostrada en la figura 4.15, puede que sea la más óptima,

la más corta pero no la más factible ya que diferentes situación le optan a que esa ruta se modifique con la finalidad de poder enviar la información sin la necesidad de tener que espera para el envío.

También se puede apreciar que un ruteo por medio de distancias será la ruta más congestionada ya que es aquella por donde se pretende enviar la información ya que se reduce tiempo en el envío y tramos más cortos lo que equivale a una minimización del uso del espectro o del ancho de banda que se pretende usar; también es fundamental conocer el tamaño de la información que se va a enviar y la capacidad de cada uno de los enlaces con la finalidad de poseer una simulación adecuada de cada uno de los recursos que se pretenden detallar; por esos motivos un ruteo por distancias es factible en el caso de querer incorporar una arquitectura nueva en donde se pretende optimizar los recursos para la implementación de esta arquitectura.

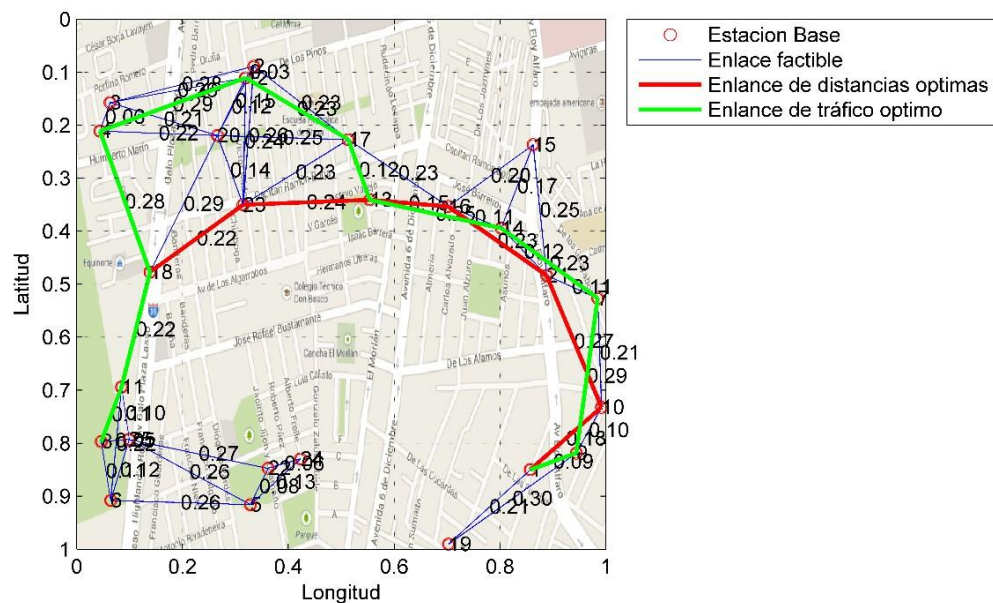


Figura 4.16. Ruteo óptimo tomando en cuenta el tráfico

El tráfico es uno de los factores que influyen para una óptima trasmisión, y más aún cuando se pretende reutilizar una infraestructura que ya posee un rango de saturación; por lo tanto es fundamental el análisis del tráfico en las redes de transmisión por la implementación de la medición inteligente como un servicio al sistema de distribución. Por medio de la gráfica 4.16 se puede observar la

diferencia expuesta anteriormente, en donde se menciona que a ruta por distancias no siempre es la ruta optima de envío de la información, ya que el tráfico de una línea de comunicación puede efectuar variaciones en el trazado original; por tal motivo se observa la gran diferencia entre las dos rutas optimas, un ruteo por tráfico es un ruteo más real del camino que pretende tomar la información para llegar a su destino. Posiblemente la ruta marcada de color verde no sea la ruta más óptima por el tiempo de uso de la infraestructura y por la distancia empleada para el envío, por es la ruta factible, la ruta disponible que se encuentra en un instante particular. Pero por cuestiones de confiabilidad, por evitar que se produzca la saturación del ancho de banda y también dependiendo del rango de importancia de la información es la ruta más adecuada para su envío. Para tener una mejor comprensión de lo expuesto se presenta la figura 4.17.

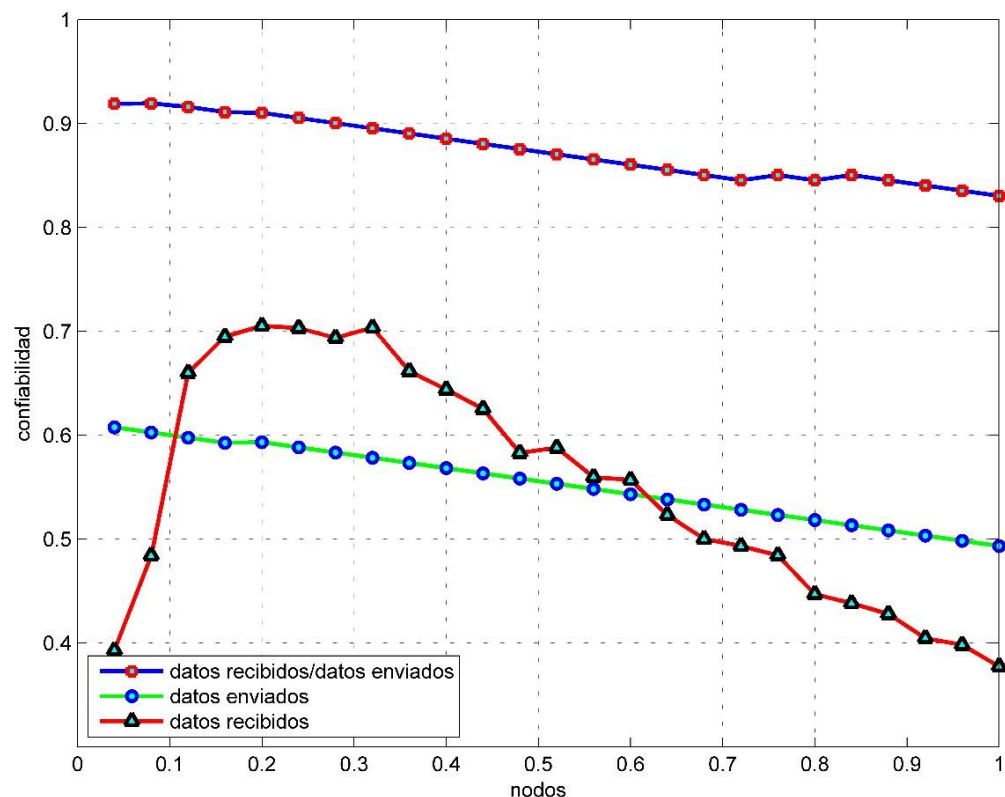


Figura 4.167. Curvas de tendencia de datos transmitidos

Con lo expuesto anteriormente se demostró la importancia de conocer el tráfico de un sistema, pero en la figura siguiente la 4.17 se puede apreciar como es la

transmisión de los datos, tanto los datos enviados, como los datos recibidos. Se puede mencionar que con un incremento de los clientes que envían como reciben la información, mientras mayor es el número de clientes empieza a existir un rango de información que no es posible transmitir, ya que se empieza a crear tráfico en la comunicación y por ende se empieza a crear saturaciones en las comunicaciones. La finalidad de esto es determinar la forma de no llegar a aumentar el tráfico de la comunicación ni llegar al punto de saturación del medio de envío.

En la figura 4.17 podemos ver la tendencia de información que no se envía en un tiempo oportuno o que se pierde en la transmisión, mientras se incrementa el número de clientes se debe de realizar un estudio de congestión de la red, el porcentaje de tráfico que se puede crear, esto ayuda a mejorar la infraestructura y a expandirla; para una expansión o del crecimiento de la infraestructura de comunicación se debe de conocer el rango de tráfico que se encuentra produciendo y la cobertura de cada una de las estaciones base; y uno de los factores determinantes de un crecimiento es el aumento de los clientes, es decir el porcentaje de incremento anual de los clientes y la capacidad de la infraestructura actual; con la finalidad de reducir las pérdidas de información ya sea por saturación de los medios de comunicación o por el tráfico producido. Este análisis involucra a todo tipo de redes; ya que el flujo de la red determina la expansión y una óptima infraestructura brinda un mejor servicio ya sea una comunicación inalámbrica o alámbrica el tráfico determina el comportamiento del medio de transmisión de los recursos.

4.3 Impacto de la infraestructura de medición avanzada en la reducción de pérdidas no técnicas

En el sector eléctrico, se ha realizado diferentes operaciones con la finalidad de disminuir el índice de pérdidas no técnicas, ya que estas pérdidas no técnicas disminuyen la eficiencia del sistema eléctrico, principalmente en el sistema de distribución, ya que el mayor consumo se encuentra en el sistema. Uno de los motivos de reducir las pérdidas de energía al máximo es por disminuir la generación, que no se pierda energía en el sistema de distribución; porque si

existe un índice elevado de pérdidas eso representa gastos técnicos como económicos; técnico por la razón de que se debe de poseer un sistema capaz de abastecer tanto la demanda como las pérdidas de cada uno de los sectores del sistema de distribución; y económicos por la razón de aumentar el parque generador para abastecer todo el consumo. Un sistema ideal sería aquel que no produzca pérdidas no técnicas o un porcentaje mínimo que no cause repercusión al sistema eléctrico de potencia, es decir que el sistema opta por pérdidas la energía que es consumida por los equipos que se utiliza para brindar el servicio pertinente.

La implementación de un sistema AMI, para el sistema de distribución, ayuda no solo a mantener el control, monitoreo del sistema eléctrico de potencia, principalmente del sistema de distribución; también nos beneficia en la reducción de pérdidas, principalmente de las no técnicas y con un consumo adecuado de los equipos conectados al sistema de distribución; aparte de ello un sistema AMI proporciona mayor confiabilidad al sistema, brinda un mejor servicio a los consumidores finales de la energía eléctrica, una mayor eficiencia de la energía que se encuentra produciendo y la factibilidad de incorporar equipos de medición del consumo de energía y a estos equipos poderlos controlar de cualquier punto estratégico; estos medidores inteligentes benefician a optimizar el consumo de energía eléctrica, es decir que estos equipos poseen la capacidad de realizar cortes y reconexiones directamente de las empresas de distribución de la energía, también con el control directo desde las empresas de distribución se puede realizar un plan tarifario de pre-pago y post-pago, esto nos ayuda a tener un consumo responsable y brindar al sistema eléctrico un consumo eficiente de la energía.

Las pérdidas en el sistema son de gran importancia de análisis, en el Ecuador existe un índice de pérdidas totales, este índice es la suma de las pérdidas técnicas y no técnicas, como ya se presentó en el capítulo 1, este índice de pérdidas hace que el sistema de distribución aumente la comercialización de energía con la finalidad de mantener el servicio de manera continua, si se reduce las pérdidas no técnicas favorece al sistema; reduce costos por operación,

disminuye la demanda que se desea abastecer y más que nada se tendrá un consumo responsable ya adecuado de la energía. A partir del año 2003 en el Ecuador se ha empezado un plan de reducción de pérdidas no técnicas, este plan ha dado un resultado favorable según los datos presentados por el CONELEC, y los datos que se presentan por cada una de las empresas de distribución, pero como ya se mencionó, con la implementación de AMI no solo se tendría las pérdidas por empresas de distribución sino que se optaría por conocer que sectores son los que más pérdidas poseen, y así tener un mejor control desde el sistema AMI a los sitios que presenten un aumento de las pérdidas.

Con la finalidad de realizar un análisis óptimo del impacto de un sistema AMI para la reducción de pérdidas no técnicas, se presenta el porcentaje de pérdidas no técnicas en el Ecuador de forma anual y según el caso de estudio presentado por [90], se puede reducir en un 9.66% las pérdidas no técnicas, con todas las ventajas que se mencionaron anteriormente. Con esto se presenta la figura mencionada a continuación, en donde se puede apreciar las pérdidas totales, pérdidas no técnicas y la disminución de las pérdidas según el caso presentado anteriormente.

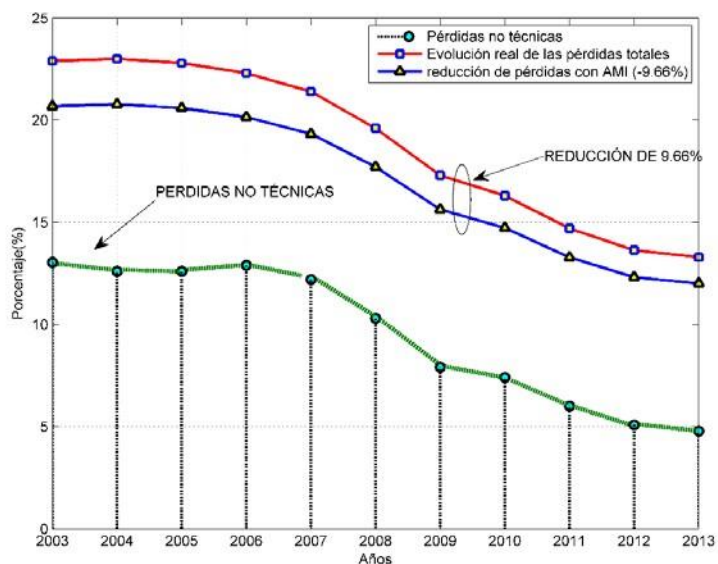


Figura 4.178. Disminución en un 9.66% de las pérdidas expuestas por el CONELEC.
Fuente: [91] CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad), "Estadística del sector eléctrico ecuatoriano 2012," Pichincha, 2012.

Para la figura 4.18 se realizó un estimado en el año 2013, determinando así un

estimado de cuanto puede ser la disminución de las pérdidas no técnicas en ese año. Ya que el último reporte emitido por el CONELEC, solo nos da los porcentajes de pérdidas hasta el año 2012. Con esta figura se observa cómo sería la tendencia o la reducción de las pérdidas con la implementación de un sistema AMI; optando por el caso de estudio presentado, se disminuiría las pérdidas y esto conllevaría a una disminución económica por parte de las pérdidas en el país; a parte de lo expuesto con una reducción de las pérdidas del sistema, se tendría un sistema de distribución, controlado, monitoreado, y su eficiencia, confiabilidad y defectibilidad aumentaría considerablemente, con respecto al sistema que se posee en la actualidad.

4.4 Plan de negocios e ingeniería de proyectos para medición inteligente.

Para establecer un plan de negocios se debe de tener en claro algunas pautas importantes de la medición inteligente; también se debe de proporcionar información del manejo de la medición las entidades que la integran y los servicios que se prestarán, por tal motivo se le ha dividido en las siguientes secciones que se mencionarán a continuación.

a) Beneficios del proyecto y agentes involucrados

La medición inteligente, fue propuesta con la finalidad de implementar y mejorar un servicio que es proporcionado por las empresas de distribución, como es el suministro de energía eléctrica, la medición inteligente se piensa en un servicio que se proyecta sobre el sistema de distribución de la energía eléctrica, es decir, en la directamente que beneficie en la demanda, mejorando el servicio eléctrico y proporcionando un nuevo servicio al sistema eléctrico, para mejorar la confiabilidad y la estabilidad del sistema. Por ese motivo la medición inteligente cubre varias necesidades que se desea corregir o mejorar en el sistema eléctrico; como es el hecho de tener una base de datos confiable de un consumo real de energía eléctrica; tener datos confiables de las pérdidas del sistema, tanto pérdidas técnicas como no técnicas, poder tener un control y monitoreo de cada uno de los sectores consumidores, y principalmente brindar energía eléctrica redundante y confiable a los consumidores.

La medición inteligente beneficia a las empresas de distribución y a los

consumidores; las empresas de distribución se encargan de proporcionar la energía necesaria para distribuirla a los diferentes sectores que su concesión; estas empresas también obtendrán la información que se requiera de cada uno de los medidores eléctricos. Los consumidores que podrán elegir qué tipo de servicio desean, un servicio pre-pago o un servicio post-pago; todo depende del usuario, esta decisión no solo ayuda al usuario, sino también a minimizar la demanda y por ende a reducir la potencia generada en las horas pico. También para que la medición inteligente funcione, tal como se presentó se requiere de un MVNO y un C-MVNO para que se encargue del arrendamiento de la tecnología de comunicación, TV White Space con la finalidad del enlace entre las empresas de distribución y los medidores inteligentes, el C-MVNO comprobaba la disponibilidad del espectro para dar paso a la comunicación y el envío de la información.

La misión de la medición inteligente es brindar un servicio de calidad, confiable y estable a cada uno de los usuarios en sectores rurales, con la finalidad de optimizar y brindar un servicio más eficiente a los usuarios.

b) Medición inteligente, servicio y clientes beneficiados

La medición inteligente es un servicio que se está optando en varios países para mejorar la eficiencia de todo el sistema eléctrico, este servicio incorpora formas más eficientes de manejar la información y de interactuar con los usuarios. La medición inteligente proporciona beneficios en toda la red de distribución, como es el caso de mantener un monitoreo y control constante de cada equipo del sistema, envío y recepción de información de cualquier sitio de la red de distribución, esta información es de gran ayuda a la gestión de la demanda, es decir para conocer cuál es el consumo de forma real de la demanda, cual es el incremento anual de forma precisa, esto ayuda a tener un control más preciso del incremento de la demanda y de la planificación en el incremento de las reservas en la generación. También se puede brindar el servicio de pre-pago y post-pago a los usuarios que se encuentren conectados a la red, poder realizar conexión y desconexión desde las empresas de distribución, esto ayuda al control óptimo del servicio pensando en que el usuario siempre debe de tener el servicio de energía eléctrica.

Cuando se habla de medición inteligente, este servicio se puede tener gran

número de beneficiarios, la medición inteligente puede ser proporcionada en cualquier sector que se desee controlar y monitorear; por lo tanto es fundamental establecer que los sectores que se benefician con esta medición es el sector eléctrico, primordialmente los agentes que consumen dicha energía, en los sectores rurales, con la finalidad de mejorar la confiabilidad del sistema, reduciendo el consumo de energía y disminuyendo las pérdidas no técnicas en el sistema, por medio del control de cada uno de los sectores y monitoreando de forma óptima cada uno de los equipos que son necesarios para proporcionar dicho servicio.

c) Operación y tipos de servicio

Cuando se habla de medición inteligente uno de los aspectos importantes de tallar es la atención que van a tener los clientes para la prestación del servicio, el usuario final tiene la potestad de determinar el tipo de trato que se la va a impartir, es decir el usuario determina si quiere un servicio continuo de energía eléctrica post-pago o un servicio que dispondrá durante un tiempo definido pre-pago. También el usuario tendrá los beneficios de optimizar su consumo, tendrá una medición más precisa, haciendo más eficiente los tiempos de pagos del servicio como los tiempos de conexiones de servicio.

Para ello se debe de tener una interconexión entre las empresas de distribución y los medidores inteligentes, el agente que se encarga de la interconexión y que presta el servicio de manejo de la red de comunicaciones en el MVNO o el C-MVNO, estos operadores se encargan de mantener habilitada la interconexión de los dos agentes involucrados y de optimizar el tiempo de uso de las redes de comunicación por ende quien se encarga de las negociaciones entre los medios de comunicación y las empresas de distribución para la interconexión, entre los medidores y el medio de comunicación es el C-MVNO

d) Expansión y gestión

El C-MVNO es la entidad encargada de la interconexión y de la transmisión de la información necesaria que van a enviar los medidores inteligentes a las empresas de distribución, el C-MVNO es el encargado de la adecuada transmisión de la información. En cambio las empresas de distribución serán las encargadas de las

negociaciones con los usuarios del servicio de medición inteligente.

Las expansiones de la infraestructura serán por medio de una planificación y una adecuada comprobación del incremento de los usuarios que puedan ingresar para beneficiarse del servicio ya sean usuarios primarios como usuarios secundarios, los planes de inversión y financiamiento de la infraestructura va a depender del nivel de uso y por la saturación de la infraestructura y de los rangos de cobertura en las diferentes zonas en donde se pretende incorporar los servicios pertinentes de medición inteligente de energía eléctrica.

En cambio para la gestión cada una de las entidades tienen una gestión que realizar, las empresas de distribución se encargan de la parte eléctrica, la medición monitoreo, conexiones y reconexiones de los medidores, equipos del sistema de distribución; el C-MVNO se encarga de la gestión de la operación de la interconexión entre las empresas de distribución y los usuarios finales, mantenimiento si es necesario. Con la finalidad de comprender una mejor manera el plan de negocios de la medición inteligente se presenta una síntesis de lo expuesto a continuación por medio de la siguiente figura.

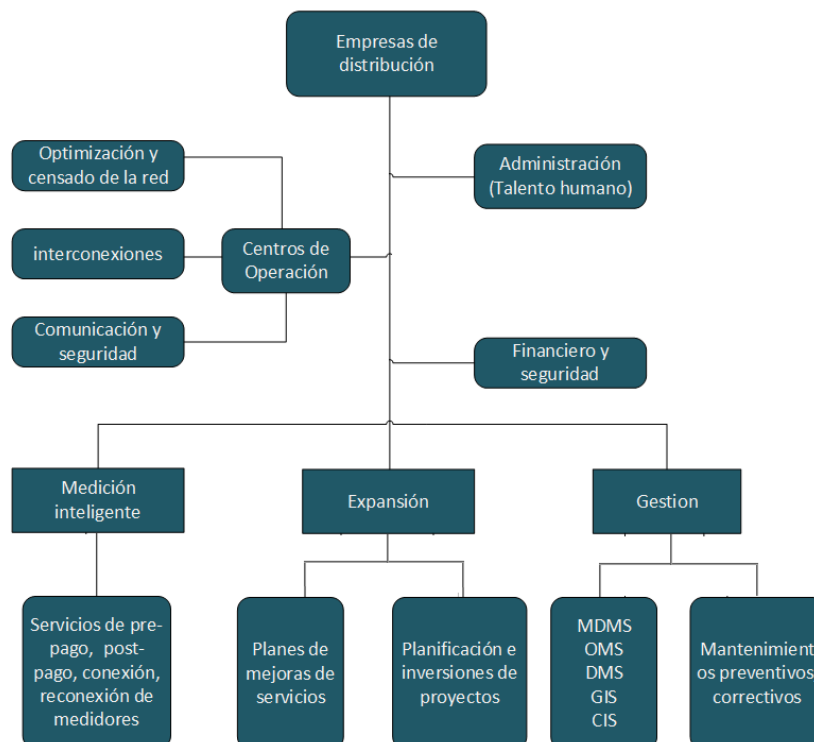


Figura 4.18. Plan de Negocios para medición inteligente

CONCLUSIONES

El presente proyecto de tesis ha permitido advertir la posibilidad de reutilizar redes inalámbricas con el fin de brindar el servicio de medición inteligente en zonas rurales y zonas remotas de difícil acceso. De lo cual tras los análisis efectuados existen aspectos fundamentales que se deben mencionar.

- La capacidad de una red inalámbrica es en zonas rurales presenta la posibilidad para albergar a los abonados de medición inteligente, una estrategia que permite adicionarlos a un sistema maduro como son las redes celulares será a través de operadores secundarios MVNO. Para las zonas de difícil acceso se puede emplear la misma estrategia pero usando los huecos blancos dejados por la TV bajo el concepto de TV White Space.
- Las simulaciones mostradas demuestran la capacidad de la tecnología para un número considerable de medidores inteligentes; esta capacidad está vinculada por la cobertura y el tráfico presente. El tráfico limita a la capacidad de las redes inalámbricas disminuyendo la cantidad de información transmitida.
- Dependiendo del sector en donde se incorpore la medición inteligente se verifica el uso de una tecnología inalámbrica para la interconexión; en zonas rurales la tecnología óptima para la transmisión es TV White Space en caso de no existir redes celulares. En Ecuador CDMA 450 ya ha sido usado en zonas remotas por la empresa Cnt para proporcionar otros servicios como internet.
- Por medio de los análisis de la capacidad del canal y de la saturación del mismo se puede comprobar lo expuesto, se puede incorporar el nuevo servicio medición inteligente abasteciendo a un sector rural usando el espectro secundario pero optimizado a través de C-MVNO para envío de la información.
- La reutilización de una infraestructura existente nos ayuda a implementar en menor tiempo el servicio de medición inteligente de energía eléctrica y se reduce de forma óptima la operación y los costos de inversión, así como la escalabilidad del sistema de forma responsable según la demanda de los usuarios celulares y de medición inteligente.
- El inconveniente de la reutilización de una infraestructura es la saturación de

ciertas zonas que se puede producir en los canales para el envío, por medio de los análisis presentados la saturación en zonas rurales se presentan en donde existe mucha conglomeración de datos, con lo expuesto la saturación se la puede controlar por medio del censado del espectro que realiza los C-MVNO.

- Un pilar fundamental de la implementación de medición inteligente es la reducción de las pérdidas no técnicas en el sistema, por medio de medición inteligente se puede reducir las pérdidas no técnicas en sistema, monitoreando el consumo eléctrico e incorporando medidas de seguridad en el sistema de distribución.
- Las pérdidas técnicas pueden ser monitoreadas y las pérdidas no técnicas controladas por medio de los centros de gestión del sistema AMI, conociendo los flujos del sistema en cada una de las líneas de distribución.
- En sectores rurales una expansión de una red inalámbrica debe de estar ligada a la capacidad de la red, a la cobertura que posea y al tráfico futuro que pueda generar los medidores inteligentes cuando empiecen a transmitir las datos hacia las empresas de distribución.
- Con la implementación de la medición inteligente de energía eléctrica a más de los objetivos ya citados se puede optimizar los recursos, obtener datos estadísticos del comportamiento de la demanda sectorizada; es decir conocer el consumo de energía eléctrica de cada uno de los sectores o área de concesión de cada una de las empresas de distribución.
- La medición inteligente es la base de un sistema moderno capaz de optimizar al máximo sus recursos, es el principio de la incorporación de nuevas tecnologías al sistema eléctrico como es el caso de redes de micro-generación o generación distribuida ubicados en su mayoría en zonas de difícil acceso o el ingreso de los vehículos eléctricos.

RECOMENDACIONES

El proyecto permite avizorar trabajos futuros en función de ciertos parámetros adicionales pertinentes a AMI; de esta manera, realizar los estudios económicos de factibilidad pueden conseguir una adecuada implementación de la infraestructura de medición inteligente obteniendo los mejores beneficios.

Los análisis de tráfico, cobertura y la capacidad adecuada de la red inalámbrica serán importantes seguir analizando para conocer de manera estadística los niveles de congestión de la red, con la finalidad de poder predecir futuros inconvenientes que se pueden presentar, o también con la finalidad de poder realizar planes de expansión de redes para mejorar la confiabilidad del sistema.

La cobertura es una variable que depende mucho de la zona o sector en donde se pretende incorporar una red inalámbrica, por ende es indispensable realizar un estudio del medio en donde se pretende instalar una nueva estación base, se debe de conocer las llanuras, elevaciones que puedan encontrarse en el sector, conocer obstáculos que impidan una buena propagación del medio, ya que una disminución de la cobertura por algún ente, provocaría la disminución de la propagación y esto da lugar a que se deba incorporar antenas repetidoras para mejorar la señal; a la final esto es un aumento en los costos de inversión.

En caso de producirse una saturación de la capacidad; en donde la cobertura no sea la suficiente para albergar a los medidores inteligentes y que se empiece a producir un excesivo tráfico, por el aumento de los usuarios que desean incorporarse en el servicio de medición inteligente, se debe de plantear planes de expansión tanto a corto plazo como a largo plazo para mitigar estos inconvenientes.

Gracias al incentivo producido por el Ministerio de Producción en proyectos como las cocinas de inducción nacionales también daría la oportunidad de producir medidores inteligentes de producción nacional con el fin de reducir la inversión por la adquisición de equipos de medición; lo que conlleva que sea más factible la integración de un sistema AMI

Con la llegada de tecnologías modernas para la transmisión de datos es fundamental a futuro incorporar estas tecnologías y realizar los modelamiento es y

simulaciones respectivas de cada una de las tecnologías, y así mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico.

Se recomienda no utilizar comunicaciones inalámbricas que requieran implementar una infraestructura nueva ya que el costo inicial por equipos, posterior mantenimiento y escalabilidad resulta un costo innecesario para una empresa dedicada a la distribución eléctrica.

REFERENCIAS

- [1] E. Inga and J. Rodríguez, "Estrategias de Negocio Para Medición Inteligente Acoplando Energías Renovables," *ISEREE*, pp. 1–10, 2013.
- [2] B. Subhash and V. Rajagopal, "Overview of smart metering system in Smart Grid scenario," *2014 Power Energy Syst. Towar. Sustain. Energy*, no. Pestse, pp. 1–6, Mar. 2014.
- [3] J. Ekanayake, K. Liyanage, J. Wu, A. Yokoyama, and N. Jenkins, *Smart GRid Technology and applications*, First edit. United Kingdom: Wiley, 2012, p. 293.
- [4] A. Sinha, S. Neogi, R. N. Lahiri, S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and N. Chakraborty, "Smart grid initiative for power distribution utility in India," *2011 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–8, Jul. 2011.
- [5] R. Hossain, A. Maung, and A. B. M. S. Ali, "Evolution of Smart Grid and Some Pertinent Issues," *Univ. Power Eng. Conf. (AUPEC), 2010 20th Australas. IEEE*, pp. 1 – 6, 2010.
- [6] S. Borlase, *Smart Grid: infrastructure, technology and solutions*, First edit. United Stated of America, 2012, p. 577.
- [7] J. T. Liao, C. I. Lin, C. Y. Chien, and H. T. Yang, "The distributed energy resources operation for EV charging stations and SHEMS in microgrids," *2014 Int. Conf. Intell. Green Build. Smart Grid*, pp. 1–6, Apr. 2014.
- [8] K. C. Budka, J. G. Deshpande, T. L. Doumi, M. Madden, and T. Mew, "Communication Network Architecture and Design Principles for Smart Grids," *Bell Labs Tech. J. IEEE*, vol. 15, no. 2, pp. 205–227, 2010.
- [9] P. Mukhopadhyay and H. K. Chawla, "Approach to make Smart Grid a reality," *2014 Int. Conf. Adv. Energy Convers. Technol.*, pp. 77–82, Jan. 2014.
- [10] J. Zheng, D. W. Gao, and L. Lin, "Smart Meters in Smart Grid: An Overview," *2013 IEEE Green Technol. Conf.*, pp. 57–64, Apr. 2013.
- [11] R. Ma, H. Chen, Y. Huang, W. Meng, and S. Member, "Smart Grid Communication : Its Challenges and Opportunities," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 36–46, 2013.
- [12] C. Selva, K. Srinivas, G. Ayyappan, and M. Venkatachala, "Advanced Meter ring Infrastructure for Smart Grid Applications," *Recent Trends Inf. Technol. (ICRTIT), 2012 Int. Conf.*, pp. 145–150, 2012.
- [13] Y. Liu, S. Member, R. A. Fischer, N. N. Schulz, and S. Member, "Distribution System Outage and Restoration Analysis Using A Wireless AMR System," *Power Eng. Soc. Winter Meet. 2002. IEEE*, vol. 00, no. c, pp. 871–875, 2002.

- [14] J. Alvarado, "Servicios de Medición Avanzada (AMI) para Redes Inteligentes y su Adaptabilidad en el Marco de la Legislación Ecuatoriana," Universidad de Cuenca, 2010.
- [15] E. Inga, "Redes de Comunicación en Smart Grid," *Ingenius*, vol. 7, pp. 36–55, 2012.
- [16] J. Momoh, *Smart Grid Fundamentals of Design and Analysis*, First Edit. Canada, 2012, p. 233.
- [17] H. Li, S. Gong, L. Lai, Z. Han, S. Member, R. C. Qiu, and D. Yang, "Efficient and Secure Wireless Communications for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1540–1551, 2012.
- [18] C. Lo and N. Ansari, "The Progressive Smart Grid System from Both Power and Communications Aspects," *Commun. Surv. Tutorials, IEEE*, vol. 14, no. 3, pp. 799–821, 2012.
- [19] M. Gupta, S. Gupta, and T. Thakur, "Design and impact of wireless AMI for distribution utilities," *2013 Annu. IEEE India Conf.*, pp. 1–6, Dec. 2013.
- [20] I. E. Reid and H. A. Stevens, *Smart Meters and the Smart Grid: Privacy and Cybersecurity Considerations*. Nova Science Publishers, Incorporated, 2012, p. 153.
- [21] L. Dan and H. Bo, "Advanced metering standard infrastructure for smart grid," *Electr. Distrib. (CICED), 2012 China Int. Conf.*, pp. 5–6, 2012.
- [22] R. R. Mohassel, A. Fung, F. Mohammadi, and K. Raahemifar, "Application of Advanced Metering Infrastructure in Smart Grids," *Control Autom. (MED), 2014 22nd Mediterr. Conf.*, pp. 822 – 828, 2014.
- [23] a. Moshari, G. R. Yousefi, a. Ebrahimi, and S. Haghbin, "Demand-side behavior in the smart grid environment," *2010 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. (ISGT Eur.)*, pp. 1–7, Oct. 2010.
- [24] J. Zhou, R. Q. Hu, and S. Member, "Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid," *Parallel Distrib. Syst. IEEE Trans.*, vol. 23, no. 9, pp. 1632–1642, 2012.
- [25] G. Barai and K. Raahemifar, "Optimization of distributed communication architectures in advanced metering infrastructure of smart grid," *2014 IEEE 27th Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, pp. 1–6, May 2014.
- [26] B. Wojszczyk, "Deployment of Advanced Smart Grid Solutions – Global Examples & Lessons Learned," *Innov. Smart Grid Technol. (ISGT), 2012 IEEE PES*, p. 1, 2011.
- [27] E. Boardman, "The role of integrated distribution management systems in Smart Grid implementations," *Power Energy Soc. Gen. Meet. 2010 IEEE*, pp. 1–6, Jul. 2010.

- [28] M. Vadari, *Electric System Operations*, First edit. British: Artech House, 2012, p. 255.
- [29] B. Saint, "Rural Distribution System Planning using Smart Grid Technologies," *Rural Electr. Power Conf. 2009. REPC '09. IEEE*, no. 09, pp. 0–8, 2009.
- [30] M. Nthontho, S. Winberg, and S. Chowdhury, "Smart communication networks standards for smart energy management," *Telecommun. Energy Conf. (INTELEC), 2011 IEEE 33rd Int.*, pp. 1 – 9, 2011.
- [31] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, and G. P. Hancke, "A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements," *Ind. Informatics, IEEE Trans.*, vol. 9, no. 1, pp. 28–42, 2013.
- [32] E. Inga and J. Inga, "Wireless Communications and Virtual Operator for Residential Electric Metering," *12th Lat. Am. Caribb. Conf. Eng. Technol.*, pp. 1–9, 2014.
- [33] D. Puthal, B. Sahoo, and B. P. S. Sahoo, "Effective Machine to Machine Communications in Smart Grid Networks," *ARN J. Syst. Softw. ©2009-2011 AJSS Journal.*, vol. 2, no. 1, pp. 18–22, 2012.
- [34] J. P. Thomesse, "Time and Industrial Local Area Networks," *CompEuro '93. Computers Des. Manuf. Prod. Proceedings.*, pp. 365 – 374, 1993.
- [35] W. Meng, R. Ma, and H. Chen, "Smart Grid Neighborhood Area Networks: A Survey," *Network, IEEE*, vol. 28, no. 1, pp. 24–32, 2014.
- [36] E. Hossain, Z. Han, and H. V. Poor, *Smart Grid communication and networking*, First edit. United States of America: Cambridge University Press, 2012, p. 481.
- [37] Fedit and E. Tecnologías de la información y telecomunicaciones, "SMART GRIDS Y LA EVOLUCIÓN DE LA RED," *Fedit*, España, pp. 1–82, 12-May-2011.
- [38] I. Standards Association, *IEEE Standard for Optical Port Communication Protocol to Complement the Utility Industry End Device Data Tables*, no. February. USA, 2011, p. 50.
- [39] S. Rana, H. Zhu, C. W. Lee, D. M. Nicol, and I. Shin, "The Not-So-Smart Grid: Preliminary work on identifying vulnerabilities in ANSI C12.22," *2012 IEEE Globecom Work.*, pp. 1514–1519, Dec. 2012.
- [40] A. F. Snyder and M. T. Garrison, "The ANSI C12 protocol suite - updated and now with network capabilities," *IEEE Power Syst. Conf. Adv. Metering, Prot. Control. Commun. Distrib. Resour. 2007. PSC 2007*, pp. 117 – 122, 2007.
- [41] I. Standards Association, *IEEE Standard for Local Area Network / Wide Area Network (LAN / WAN) Node Communication Protocol to Complement the Utility Industry End Device Data Tables*, no. June. USA, 2012, p. 239.

- [42] T. Basso, J. Hambrick, and D. Deblasio, "Update and Review of IEEE P2030 Smart Grid Interoperability and IEEE 1547 Interconnection Standards," *Innov. Smart Grid Technol. (ISGT), 2012 IEEE PES*, pp. 1–7, 2012.
- [43] V. C. Güngör, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergüt, C. Buccella, C. Cecati, and G. P. Hancke, "Smart Grid Technologies : Communication Technologies and Standards," *Ind. Informatics, IEEE Trans.*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, 2011.
- [44] H. V. Orejuela, "BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA APLICACIÓN DEL PLAN DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN EL ECUADOR," *Ecuaciel*, Machala, pp. 1–20, 2014.
- [45] E. Inga, G. Arévalo, and R. Hincapié, "Optimal Deployment of Cellular Networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid," *2014 IEEE Colomb. Conf. Commun. Comput.*, no. 1The 2014 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, p. 6, 2014.
- [46] L. Duan, J. Huang, and B. Shou, "Cognitive Mobile Virtual Network Operator : Investment and Pricing with Supply Uncertainty," *INFOCOM, 2010 Proc. IEEE*, pp. 1 – 9, 2010.
- [47] M. Hassan and N. Cardona, "Planificación de sistemas UMTS mediante sistemas de información geográfica," Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, 2003.
- [48] E. Ordóñez and J. Inga, "Análisis Técnico, Económico y Regulatorio para el Ingreso de un Operador Móvil Virtual en el Ecuador," Universidad Politécnica Salesiana, 2013.
- [49] C. Ramirez, "Contribuciones a la gestión de los recursos radio en redes móviles celulares de radio paquetes con soporte de calidad de servicio," Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2011.
- [50] E. Ortega, D. Cazco, V. Luna, and J. Ortega, "Comunicaciones celulares para medición inteligente de energía eléctrica en sistemas de distribución," *ingenius.ups.edu.ec*, pp. 21–33, 2013.
- [51] I. Pérez, "Arquitectura de un sistema C4ISR para pequeñas unidades," Universidad Politécnica de Valencia, 2009.
- [52] G. Ruiz and J. Hermenegildo, "Aplicación de los sistemas VSAT a regiones remotas del territorio Nacional," Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2013.
- [53] I. Joe, J. Y. Jeong, and F.-Q. Zhang, "Design and Implementation of AMI System Using Binary CDMA for Smart Grid," 2013, pp. 544–549.
- [54] K. S. Zigangirov, *THEORY OF CODE DIVISION MULTIPLE ACCESS COMMUNICATION*, First edit. Canada, 2004, p. 412.
- [55] C. Martinez, "Asignación de recursos multi-capas en redes inalámbricas móviles," Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2011.

- [56] A. Araujo, "Evaluación de la Aplicabilidad de la tecnología CDMA 450 en el AUSTRO Ecuatoriano Mediante la Utilización de un Modelo Basado en Sistemas de Información Geografica," Universidad de Cuenca, 2011.
- [57] C. Ramírez, "Contribuciones a la gestión de los recursos radio en redes móviles celulares de radio paquetes con soporte de calidad de servicio," Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2011.
- [58] A. B. Montilla, "Arquitectura de red de acceso móvil de cuarta generación : Mobile-IP RAN," Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [59] C. Añazco, "Diseño Básico de Redes de Acceso FTTH utilizando el estándar GPON," Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2013.
- [60] D. Uribe, "USO DE LA BANDA 450 MHz CON LA TECNOLOGÍA DE ACCESO MÚLTIPLE POR UNIVERSAL," Universidad Andina Simón Bolívar, 2009.
- [61] S. Bacuilima, "Estudio y Diseño de una Red WiMAX para la Ciudad de Cuenca," Universidad de Cuenca, 2010.
- [62] L. Ortiz, "Análisis y diseño de técnicas de reservación para redes wimax ieee 802.16," Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [63] X. Paredes, "Propuesta para la implementación de la tecnología UMTS Long Term Evolution en la ciudad de Guayaquil," Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2014.
- [64] E. Inga, "La telefonía móvil de cuarta generación 4G y Long Term Evolution," *Ingenius*, pp. 1 – 10, 2010.
- [65] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE the UMTS Long Term Evolution from theory to practice*, Second edi. Great Britain, 2011, p. 794.
- [66] A. Nuñez, "Diseño de una red de nueva generación LTE-A para una zona urbana en Bogotá bajo el estándar 3gpp y la recomendación ITU-R M . 1457," Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [67] R. Zhang, "Spectrum allocation and medium access in cognitive radio wireless networks," *2009 Eur. Wirel. Conf.*, pp. 90–95, May 2009.
- [68] A. Vega, "Evaluación del Espectro radioelectrico VHF/ UHF en parroquias urbanas y rurales del cantón Loja para el despliegue de sistemas de radio cognitiva," ESPE Universidad de las Fuerzas Armadas, 2013.
- [69] L. Zhang, K. Zeng, and P. Mohapatra, "Opportunistic Spectrum Scheduling for Mobile Cognitive Radio Networks in White Space," *Wirel. Commun. Netw. Conf. (WCNC), 2011 IEEE*, pp. 844–849, 2011.

- [70] N. García, "Modelo de cobertura en redes inalámbricas basado en radiosidad por refinamiento progresivo," Universidad de Oviedo, 2006.
- [71] V. Toledo, "Análisis y diseño de mecanismos de handoff en redes inalámbricas de banda ancha IEEE 802.16e," Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [72] J. Pradilla, "W-Spaces TV Teconologia de canal de retorno para el estándar DVB-T mediante el uso de WRAN," Universidad Icesi, 2012.
- [73] S. Caraguay, "Simulación de la red inalámbrica de banda ancha con tecnología Wimax para el Estado de Colima," Universidad de Colima, 2011.
- [74] K.-L. Du and M. N. S. Swamy, *Wireless Communication Systems: From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*. Cambridge University Press, 2010, p. 1020.
- [75] O. Fatemieh, R. Chandra, and C. a. Gunter, "Low cost and secure smart meter communications using the TV white spaces," *2010 3rd Int. Symp. Resilient Control Syst.*, pp. 37–42, Aug. 2010.
- [76] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005, p. 676.
- [77] N. Rakheja, P. Bhatia, V. Sevani, and V. J. Ribeiro, "ROSALNet: A spectrum aware TDMA mesh network for rural Internet connectivity," *2014 Twent. Natl. Conf. Commun.*, no. i, pp. 1–6, Feb. 2014.
- [78] T. J. Harrold, L. F. Wang, M. A. Beach, G. Salami, A. Yarmohammad, and O. Holland, "Spectrum Sharing and Cognitive Radio Opportunities for Efficiency Enhancement," *Ultra Mod. Telecommun. Work. 2009. ICUMT '09. Int. Conf.*, pp. 1 – 8, 2009.
- [79] M. Brew, F. Darbari, L. H. Crockett, M. B. Waddell, M. Fitch, S. Weiss, R. W. Stewart, R. Bbc, C. House, W. Lane, and W. London, "UHF White Space Network for Rural Smart Grid Communications," *Smart Grid Commun. (SmartGridComm), 2011 IEEE Int. Conf.*, pp. 138–142, 2012.
- [80] SENATEL, "Ocupación del espectro UHF por provincias," Pichincha, 2014.
- [81] SENATEL, "Ocupación del espectro VHF por provincias," Pichincha, 2014.
- [82] CONATEL, *Resolución-No.-CITDT-2014-01-032*. Quito: CITDT, 2014, pp. CITDT–2014–01–032.
- [83] CONATEL, *Resolución 084-05-CONATEL-2010*. Quito: CONATEL, 2010, pp. 084–05–CONATEL–2010.
- [84] SENATEL, "Numero de estaciones base y repetidoras de television," Pichincha, 2014.

- [85] CONATEL, "Plan Nacional de Frecuencia," Pichincha, 2012.
- [86] Y. Hong and S. Kwong, "Learning Assignment Order of Instances for the Constrained K-Means Clustering Algorithm," *IEEE Trans. Syst. MAN, Cybern. B Cybern.*, vol. 39, no. 2, pp. 568–574, 2009.
- [87] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, *Introduction to Algorithms*, Third Edit. Cambridge, Massachusetts- London. England, 2011, p. 1313.
- [88] M. Pióro and D. Medhi, *Routing, flow, and capacity Design in Communication and computer networks*, First. USA, 2004, p. 794.
- [89] A. B. Martinez, "Evaluation of multiuser scheduling algorithm in OFDM for different services," Norwegian University, 2006.
- [90] A. Khazaei and M. Ghasempour, "DISTRIBUTION LOSS MINIMIZATION : A CASE STUDY IN A COMMERCIAL SECTION IN MASHHAD," *IEEE 22 nd Int. Conf. Electr. Distrib.*, pp. 1 – 4, 2013.
- [91] CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad), "Estadística del sector eléctrico ecuatoriano 2012," Pichincha, 2012.